

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

TECHNOLOGIE PŘÍPRAVY HLUBOKÝCH STRUKTUR V SUBMIKRONOVÉM ROZLIŠENÍ

SUBMICRON STRUCTURES WITH DEEP RELIEF — TECHNOLOGY OF PREPARATION

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Milan Matějka

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Vladimír Kolařík, Ph.D.

BRNO 2016

Abstrakt

Disertační práce je zaměřena na výzkum a vývoj v oblasti vytváření mikrostruktur technologií elektronové litografie. V úvodní části je provedena rozsáhlá studie technologie elektronové litografie z pohledu fyzikálních principů, strategie zápisu a záznamových materiálů. Následuje popis fyzikálního principu metod leptání pro přenos reliéfních struktur do podložek nebo jejich prohlubování. Vlastní práce se zabývá inovativními postupy při modelování, simulaci, datové přípravě a optimalizaci technologických postupů. Přináší nové možnosti záznamu hlubokých binárních i víceúrovňových mikrostruktur pomocí elektronové litografie a metod plasmatického a reaktivního iontové leptání. Zkušenosti a znalosti z oblastí mikrolitografie a plasmatického i mokrého anizotropního leptání křemíku byly využity při návrhu procesu výroby nano strukturovaných membrán. Následovalo praktické ověření a optimalizace realizačního procesu přípravy těchto membrán.

Klíčová slova

Elektronová litografie (EBL), 3D litografie, mikrotechnologie, mikrovýroba, mikrostruktury, MEMS, datová příprava, simulace jevu blízkosti (PES), korekce jevu blízkosti (PEC), leptání křemíku, plasmatické procesy.

Abstract

The dissertation thesis is focused on research and development in the field of microfabrication by the technology of electron beam lithography. In the first part of this work, the extensive study is conducted in the field of technology of electron beam lithography in terms of physical principles, writing strategies and resist materials. This is followed with description of physical principles of etching for the transfer of relief structures into substrates. The thesis describes innovative techniques in modelling, simulation, data preparation and optimization of manufacturing technology. It brings new possibilities to record deep binary or multilevel microstructures using electron beam lithography, plasma and reactive ion etching technology. Experience and knowledge in the large area of microlithography, plasma and anisotropic wet-etching of silicon have been capitalized to the design process of manufacturing of nano-patterned membranes. It was followed with practical verification and optimization of the microfabrication process.

Keywords

Electron beam lithography (EBL), 3D lithography, microtechnology, microfabrication, microstructures, MEMS, data preparation, proximity effect simulation (PES), proximity effect correction (PEC), silicon etching, plasma processes.

Bibliografická citace

MAŤEJKA, M., *Technologie přípravy hlubokých struktur v submikronovém rozlišení*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, (2016), 136 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Vladimír Kolařík, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou disertační práci na téma "Technologie přípravy hlubokých struktur v submikronovém rozlišení" vypracoval samostatně pod vedením školitele doc. Ing. Vladimíra Kolaříka, Ph.D., a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor disertační práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 30.8.2016

.....

Ing. Milan Matějka

Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří mě jakýmkoliv způsobem podporovali při tvorbě této práce. Velký dík patří mému školiteli Doc. Ing. Vladimírovi Kolaříkovi, Ph.D, za nejen metodické podněty při vedení práce, ale i za cenné rady, přátelský a vstřícný přístup. Můj dík patří také mým kolegům a spolupracovníkům z Ústavu přístrojové techniky AVČR, jmenovitě z oddělení speciálních technologií a týmu EBL, za možnost společně se podílet na řešení zajímavé problematiky a možnost spolupráce ve vstřícném a přátelském kolektivu.

Dále bych touto cestou rád poděkovat výzkumné instituci Ústavu přístrojové techniky a Aplikačním a vývojovým laboratořím mikrotechnologií a nanotechnologií za vytvoření pracovního prostředí umožňující práci s unikátními zařízeními, díky které mohla tato práce vzniknout.

Zvláštní poděkování patří mému otci Františkovi Matějkovi (jednomu z "Guru" elektronové litografie v ČR), kterému se během více jak 30 let působení v oboru technologie elektronové litografie podařilo posunout obor na špičkovou úroveň. Díky jeho úsilí a nadšení, také našel řadu následovníků, kteří v jeho práci úspěšně pokračují. Mé osobní poděkování mu patří za to, že mě již v dětství dokázal nadchnout pro práci v oboru EBL. Jako poděkování za jeho výchovu, dlouholetou podporu, trpělivost a zvláště za neocenitelné rady a zkušenosti z oboru, které mi během let předal, bych mu rád tuto práci věnoval.

Konečně bych chtěl poděkovat svým rodičům, manželce a dětem za notnou dávku trpělivosti, nejen po dobu psaní této disertační práce, ale i během doby mého dlouholetého studia na Vysokém Učení technickém v Brně.

Tato práce vznikla za podpory grantů a projektů:

- Projekt FR-TI1/576 - Optimalizace výrobních postupů v elektronové litografii (2009-2012)
- Projekt No. CZ.1.05/2.1.00/01.0017 ALISI - Aplikačním a vývojovým laboratořím mikrotechnologií a nanotechnologií
- Projekt TE01020118 - Centrum kompetence: Elektronová mikroskopie
- Projekt TE01020233 - Platforma pokročilých mikroskopických a spektroskopických technik pro nano a mikrotechnologie)
- Projekt VG20132015124 - Nová metoda měření odezvy konstrukce ochranné obálky pro zajištění bezpečnosti JE i v případě těžkých havárií
- LO1212 - ALISI - Centrum pokročilých diagnostických metod a technologií

Obsah

1 ÚVOD	1
2 VÝCHOZÍ STAV	2
2.1 STRUKTURY SE SUBMIKRONOVÝM ROZLIŠENÍM	2
2.2 ÚVOD DO MIKROVÝROBY	3
2.3 ELEKTRONOVÁ LITOGRAFIE	4
2.3.1 Elektronový litograf	4
2.3.1.2 Elektronový litograf TESLA BS600	7
2.3.1.3 Elektronový litograf VISTEC EBP5000plusES	8
2.3.2 Fyzikální princip elektronové litografie	10
2.3.2.1 Rozptylové jevy	10
2.3.2.2 Dopředný rozptyl	11
2.3.2.3 Zpětně odražené elektrony	13
2.3.2.4 Sekundární elektrony	13
2.3.3 Přenos obrazu do rezistu přímou expozicí	14
2.3.3.1 Strategie zápisu	14
2.3.3.2 Datová příprava v programovém prostředí Expo.NET	16
2.3.4 Elektronové rezisty	18
2.3.4.1 Organické rezisty	19
2.3.4.2 Depozice rezistů	22
2.3.4.3 Vyvolávání a vytvrzování rezistů	23
2.4 LEPTÁNÍ	25
2.4.1 Kategorizace leptacích procesů	25
2.4.2 Plasmatické leptání	26
2.4.2.1 Plasmatická aparatura	26
2.4.2.2 Chemie plasmatu — kyslík	28
2.4.2.3 Chemie plasmatu — tetrafluormethan	29
2.4.3 Leptání při výrobě membrán a MMS	31
2.4.3.1 Nitrid křemíku — materiál pro tvorbu membrán	31
2.4.3.2 Mokrý anizotropní leptání křemíku při tvorbě otvoru pro membrány	33
3 CÍLE PRÁCE	35
4 VLASTNÍ PRÁCE	37
4.1 EBL - OPTIMALIZACE POSTUPU DATOVÉ PŘÍPRAVY PRO BS600	39
4.1.1 Vývoj Algoritmů pro datovou přípravu mřížek s pilovým profilem	39

4.1.2 Mřížky s pilovým profilem: základní způsob datové přípravy.....	39
4.1.3 Mřížky s pilovým profilem: algoritmus s vyhlazováním v jednom směru	41
4.1.4 Mřížky s pilovým profilem: algoritmus s vyhlazováním ve dvou směrech	43
4.1.5 Mřížky s pilovým profilem: zápis v mezním rozlišení.....	44
4.1.6 Zápis datově optimalizovaných mřížek s mělkým pilovým profilem	45
4.1.7 Zápis datově optimalizovaných víceúrovňových mikrostruktur — kompenzace tvaru křivky citlivosti	50
4.2 SIMULACE A KOREKCE JEVU BLÍZKOSTI U EBL BS600.....	55
4.2.2 Simulace jevu blízkosti u EBL BS600 pro binární struktury	57
4.2.3 Korekce rozptylu elektronů — případ binární expozice	65
4.2.4 Simulace jevu blízkosti pro víceúrovňové struktury	74
4.3 APLIKACE PLASMATICKÉHO LEPTÁNÍ PŘI VÝROBĚ MIKROSTRUKTUR	78
4.3.1 Přesné ladění hloubky reliéfu plasmatickou cestou.....	78
4.3.2 Charakterizace binárního plasmatického křemíku přes rezistovou masku.....	81
4.3.3 Technologie prohlubování víceúrovňových reliéfních struktur plasmatickým leptáním.....	86
4.3.4 Leptání přes postupně vyvolávanou masku.....	86
4.3.5 Leptání přes postupně mizící masku	90
4.4 VÝROBA MIKRO A NANO STRUKTUROVANÝCH MEMBRÁN	94
4.4.1 Výchozí technologický postup	94
4.4.2 Litografie z horní strany desky	96
4.4.3 Příprava masky pro litografii ze zadní strany desky.....	98
4.4.4 Litografie ze zadní strany desky	99
4.4.1 Finální operace	101
5 DISKUZE A ZÁVĚR	103
POUŽITÁ LITERATURA	105
SEZNAM VLASTNÍCH PUBLIKACÍ.....	109
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	114
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ.....	116
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	118
SEZNAM TABULEK.....	125
CURRICULUM VITAE	126

1 Úvod

Většina mikro/nano výrobních metod a technologií má své kořeny ve standardních výrobních metodách vyvinutých polovodičovým průmyslem pro výrobu integrovaných obvodů (IO) [1], [2], [3]. K rozvoji mikrovýroby došlo krátce po vynálezu IO – Jake Kilby r. 1958. K rapidnímu pokroku v oblasti mikrovýroby došlo s rozvojem mikrolitografie od roku 1970 [2].

V poslední dekádě se mikrotechnologie a nanotechnologie dostávají stále více do popředí zájmu průmyslových odvětví, ale i naší společnosti. Oblast využití se významně rozrostla z původního úzkého zaměření výroby IO. Tyto technologie v současnosti ovlivňují dění v široké škále průmyslových odvětví a vědních oborů jako mikroelektronika, optoelektronika, optika a mikrooptika, mikromechanika (*multifunctional micro systems*, MMS), mikroelektromechanika (*microelectromechanical systems*, MEMS), fotonika, materiálové inženýrství, fyzika povrchů, molekulární a organická chemie, bioinženýrství, medicína, a mnoho dalších [4].

Pro pokračující vývoj a posun mikrotechnologií a nanotechnologií je nutný neustálý vývoj nových zařízení, technologií a optimalizace nebo aplikace stávajících výrobních postupů pro tvorbu struktur se submikronovými detaily nebo rozlišením.

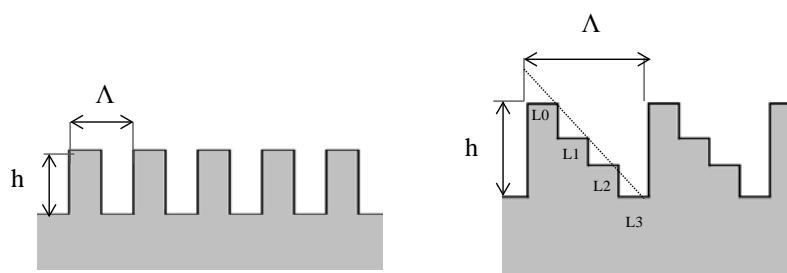
Studiem fyzikálního principu litografie elektronovým svazkem lze umožnit přesnou simulaci a optimalizaci dávek ozáření pro zaznamenávaný obraz. Aplikací modelu rozpouštění rezistu lze docílit simulace tvorby reliéfu u zaznamenaného obrazu, což přináší nové možnosti přesnějšího záznamu binárních masek pro další opracování podložek nebo funkčních vrstev.

Důkladná znalost strategie zápisu pro binární litografie umožňuje navrhnout či optimalizovat strategii zápisu pro šedou litografii umožňující tvorbu víceúrovňových struktur, které se svým tvarem stále více přibližují tvaru ideálnímu. Zpětnou aplikací modelu charakterizujícího vlastnosti rezistu při procesu vyvolávání lze dále optimalizovat proces expozice i vyvolávání, což vede k dalšímu zvyšování přesnosti přípravy víceúrovňových struktur.

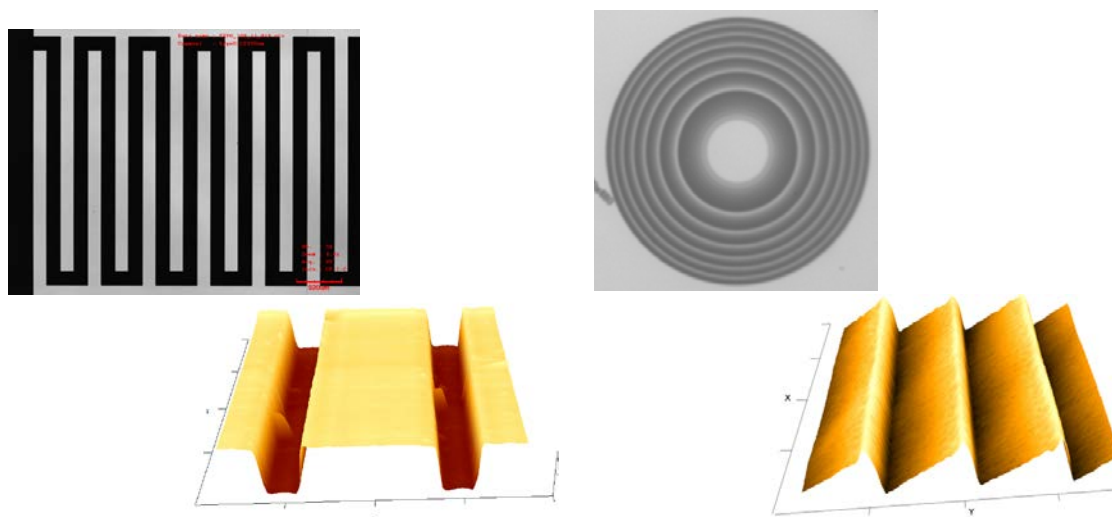
2 Výchozí stav

2.1 Struktury se submikronovým rozlišením

Jak již bylo napsáno v úvodu, mikrovýrobní techniky byly vyvinuty pro vytváření struktury mikronových a sub-mikronových rozměrů, tzv. mikrostruktur. Pro tvorbu mikrostruktur, jejichž rozměry jsou v oblasti kolem $1\text{ }\mu\text{m}$, je navíc žádoucí, aby metoda zápisu dosahovala submikronového rozlišení. Rozlišením zápisu můžeme rozumět velikost obrazového bodu pro danou zápisovou techniku. Pro případ záznamu binárního motivu lze rozlišením rozumět vzdálenost dvou obrazových bodů, které jsme schopni zaznamenat a rozlišit. V případě tvorby víceúrovňových mikrostruktur, kdy technika tvorby je někdy nazývána jako šedá litografie (z anglického *grayscale lithography*) nebo 3D litografie, může být rozlišení definováno také jako vzdálenost dvou obrazových bodů mezi jednotlivými stupni struktury. Díky významnému rozvoji a vývoji litografických technik již existují zařízení umožňující zápis obrazů s rozlišením zápisu na úrovni jednotek až desítek nanometrů, tj. v submikronové a nanometrové oblasti. Jednou z rozšířených technik umožňujících pracovat s touto přesností zápisu je mimo jiné i elektronová litografie (EBL).



Obr. 2.1.1 Příklad definice reliéfní mikrostruktury a) binárního prvku; b) víceúrovňového prvku.



Obr. 2.1.2 Snímek binárních a víceúrovňových mikrostruktur: výstup binární litografie meandrového motivu bio mikrosenzoru – Au na SiO_2 (vlevo), šedá litografie on-axis mikro Fresnelovy čočky, detail části víceúrovňové mikrostruktury čočky (vpravo).

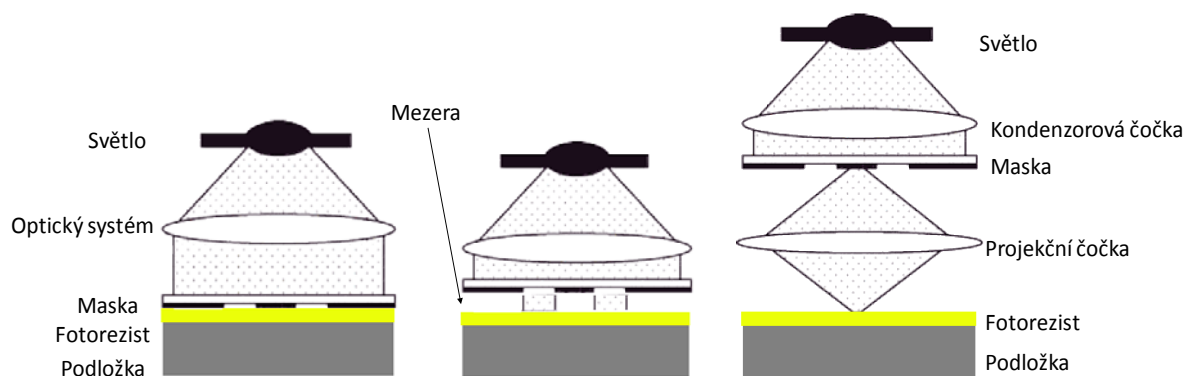
Pokud se blíže zaměříme na vertikální rozměry mikrostruktur (tj. jejich výšku/hloubku), tak zjistíme, že jejich typické rozměry se pohybují v oblasti od 10 nm do 1 μm [3]. Tento rozsah je většinou plně dostačující pro případ tvorby IO, kde je větší nárok kladen na minimální velikost prvku (z anglického *minimum feature size*, MFS). V jiných oborech jako je například mikrooptika, difrakční optika, MMS a MEMS bývají požadovány i struktury hlubší.

Z pohledu litografických technik však není vždy jednoduché vytvářet hluboké mikrostruktury ($h < 1 \mu\text{m}$) v případě, že se hodnota parametru MFS pohybuje v oblasti kolem 1 μm . V případě klasické UV fotolitografie jsou omezujícími parametry vlnové vlastnosti světla, hloubka ostrosti a vlastnosti zápisové materiály. V případě EBL, která jinak exceluje z hlediska rozlišení, je třeba řešit řadu dalších problémů souvisejících se způsobem interakce elektronů s pevnou látkou, hloubkou penetrace elektronů do materiálu, jevem blízkosti (tzv. proximity efekt), vlastnostmi zápisového materiálu při depozici, expozici i vyvolávání atd. Z výroby těchto typů struktur se tedy stává poměrně komplexní úloha vyžadující v mnoha případech úpravy a optimalizaci metodiky výrobního procesu nebo kombinaci několika mikro výrobních technik a technologií.

2.2 Úvod do mikrovýroby

Mikrovýroba je technická disciplína, jenž zahrnuje širokou oblast technik a technologií, díky kterým lze vytvářet struktury, jejichž laterální rozměry (v ose X, Y) jsou v oblasti kolem 1 μm , tedy jedné tisícině milimetru (rozsah je však poměrně široký od 0,1 μm do 100 μm) [1]. Vertikální rozměry mikrostruktur (v ose Z) se mohou pohybovat od atomárních tloušťek vrstev (0,1 nm) až po stovky mikrometrů. Typicky se však tloušťka mikrostruktur pohybuje v oblasti od 10 nm do 1 μm [2]. Jedním z mikro výrobních oborů, který umožňuje tvorbu mikrostruktur, je mikrolitografie.

Mikrolitografie vznikla jako technický obor, který svým zařazením patří do větve litografií aplikovaných pro výrobu IO [1]. Počátky mikrolitografie jsou u optické litografie, kdy k tvorbě rezistových masek pro další opracování podložek (nejčastěji křemíkových) docházelo za pomoci osvětlení binárního motivu na optické masce a následného přenosu tohoto vzoru do fotorezistu naneseného na podložce, viz Obr. 2.2.1.



Obr. 2.2.1 Princip optické litografie: kontaktní (vlevo), blízká resp. proximity (uprostřed) a projekční (vpravo) [7].

Vzhledem k fyzikálním omezení optické litografie, kdy velikost zaznamenaných objektů, tedy rozlišení obrazu, již nebylo možné touto technikou dále zmenšovat, došlo k vývoji nových litografických technik. Podle principu tvorby struktur a použitého zápisového media se tyto litografie dělí na:

- litografie v ultra-fialové oblasti (UVL);
- litografie v hluboké ultra-fialové oblasti (DUVL, Deep-UVL);
- litografie v extrémní ultra-fialové oblasti (EUVL);
- elektronová litografie (EBL) ;
- rentgenová litografie (X-RAYL) ;
- iontová litografie (FIBL, RIE) ;
- nanoimprint litografie (NIL) ;
- mikrostereolitografie (μ SL).

2.3 Elektronová litografie

Aplikace fokusovaného elektronového svazku v technologii začala na počátku 20. století. Počáteční aplikace byly v oblasti mikroskopie, kdy v 60 letech 20. století byl vyvinut první rastrovací elektronový mikroskop (SEM). Poznatky z vývoje SEM byly později aplikovány i při vývoji systémů umožňujících zápis s fokusovaným svazkem [7], tyto systémy nazýváme elektronové litografy.

Technologie EBL byla vyvinuta pro potřeby průmyslu při výrobě IO. Patří do kategorie litografií s ultra vysokým rozlišením zápisu. Velikost stopy zápisového bodu se pohybuje od jednotek po stovky nanometrů. Za určitých podmínek bylo technologií EBL dokonce dosaženo zápisu struktur v rozlišení lepším než 10 nm [9], [10], [11]. Hlavní tři větve aplikace EBL jsou tyto:

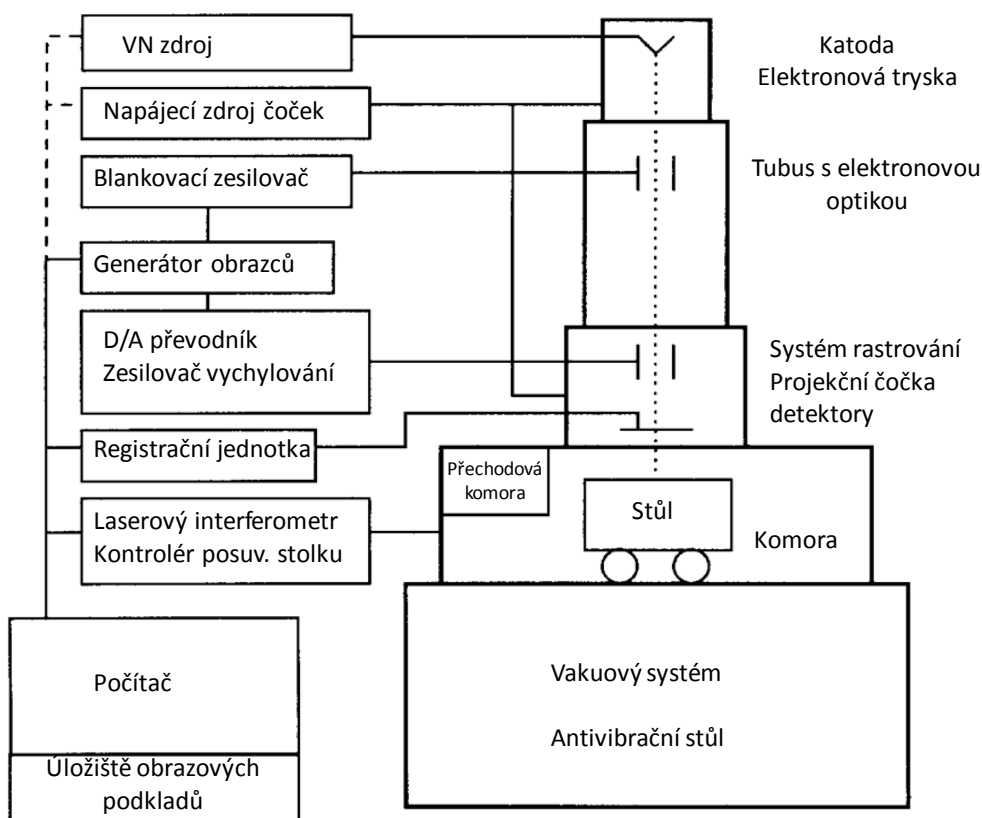
- výroba chromových masek pro optickou litografii;
- výzkum a vývoj v oblasti miniaturizace IO;
- přímý zápis mikrostruktur při tvorbě pokročilých prototypů (IO, MMS, MEMS, optické prvky apod.).

Postupem času se EBL stala jednou z nejvíce užívaných technik pro zápis mikrostruktur a nanostruktur. Významné využití našla i v mnoha dalších souvisejících oborech zabývajících se mikrotechnologiemi a nanotechnologií (MEMS, fotonika, mikrooptika, apod.).

2.3.1 Elektronový litograf

Elektronový litograf (ELG, anglicky zpravidla *electron beam pattern generator*), schematicky zobrazený na Obr. 2.3.1, je zařízení skládající se z elektronové trysky, tubusu, komory, vakuového čerpacího systému a řídicí elektroniky. Elektronová tryska obsahuje zdroj elektronů založený na principu termické emise, auto emise nebo Shottkyho emise. Samotný zdroj elektronů je katoda, která přivedením silného záporného potenciálu řádu až desítek kV, emituje svazek primárních elektronů (*primary electrons*, PE). Výsledná kinetická energie PE je dána rozdílem potenciálu mezi anodou a katodou (urychlovacím napětím). Elektronový

svazek dále prochází systémem čoček v elektronově optické části tubusu elektronového litografu, ve kterém dochází ke zpracování svazku do požadovaného tvaru a rozměru. Následuje část obsahující vychylovací systém umožňující pohyb svazku v zápisovém poli. Koncová část tubusu obsahuje projekční čočku umožňující promítání svazku do roviny na povrchu podložky. V komoře litografu je umístěn přesný litografický stůl s laserovým odměřováním polohy, který umožňuje pohyb podložky ve větším rozsahu, než by umožnil jen samotný systém vychylování. Během zápisu se na podložku přenáší počítačem generovaný obraz pomocí kombinace pohybu elektronového svazku ve vychylovacím poli (rastrování) a pohybu stolu se substrátem. U některých typů *ELG* je možné zapisovat i v modu letícího stolu (z anglického *flying stage*), kdy k zápisu obrazu dochází jen za pomoci pohybu stolku s podložkou vůči nepohybujícímu se elektronovému svazku. Z povahy elektronů je nutné, aby celý systém byl vakuový. Čerpání komory a tubusu zajišťuje systémem rotačních, turbo-molekulárních a iontových pump. Pracovní tlak v komoře činí 10^{-3} Pa, v tubusu je pak o něco lepší vakuum, až 10^{-6} Pa.



Obr. 2.3.1 Blokové schéma elektronového litografu [2].

Elektronové litografy lze podle způsobu zpracování elektronů svazku, tvaru stopy a způsobu přenosu obrazových informací rozdělit:

- a) Elektronový litograf s kruhovým (gaussovským) svazkem konstantního rozměru
- b) Elektronový litograf s kruhovým (gaussovským) svazkem proměnného rozměru
- c) Elektronový litograf s tvarovaným svazkem konstantního rozměru
- d) Elektronový litograf s tvarovaným svazkem proměnného rozměru

e) Multi-svazkový elektronový litograf

Elektronové litografy lze podle způsobu zpracování svazku elektronů, tvaru stopy a způsobu přenosu obrazových informací rozdělit na:

- f) elektronový litograf s kruhovým (gaussovským) svazkem konstantního rozměru;
- g) elektronový litograf s kruhovým (gaussovským) svazkem proměnného rozměru;
- h) elektronový litograf s tvarovaným svazkem konstantního rozměru;
- i) elektronový litograf s tvarovaným svazkem proměnného rozměru;
- j) multi-svazkový elektronový litograf.

První dva zmiňované systémy jsou principiálně založeny na klasické technologii zpracování elektronových svazků, která se používá také u *SEM* a skenovací transmisní mikroskopie (*STEM*) [12]. Při zápisu se využívá svazek elektronů fokusovaný do bodové stopy kruhového tvaru. Bodová stopa svazku má gaussovské rozložení energie elektronů. Z hlediska hardware jde většinou o konverze systému *SEM* nebo jejich modifikace na systém *ELG*. Z hlediska zápisových vlastností se využívají převážně pro výzkumné a vývojové účely. V oblasti výroby *IO* nemají příliš velké opodstatnění z důvodu nižší rychlosti zápisu.

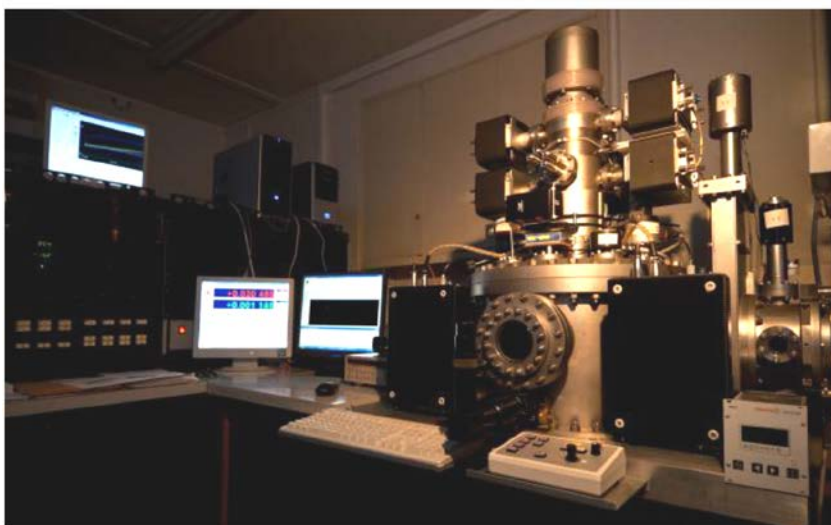
V případně typu s proměnným průměrem svazku umožňuje optická soustava pomocí kondenzorových čoček rozostřit stopu elektronového svazku v určitém rozsahu. Zástupci těchto litografů se, vzhledem k možnosti zapisovat vyšší rychlostí, využívají jak pro výzkumné tak pro polo-průmyslové účely (např. tvorba prototypů mikro/nano struktur).

Elektronový litograf s tvarovaným svazkem (z anglického *variable shaped beam*, *VS*B) byl vyvinut v důsledku požadavků výrobců integrovaných obvodů (pro technologie s vysokým stupněm integrace, *very large scale integration* – *VLSI*, *ultra large scale integration* – *ULSI*) na vyšší propustnost výrobního procesu a snížení nákladů na výrobu *IO* [12]. Strategie tvorby elektronového svazku je stejná jako u systémů se svazkem kruhovou stopou. Navíc však obsahuje modul umožňující tvarování elektronového svazku případně i změnu rozměru. Tento modul je tvořen clonami a elektrostatickými cívkami umožňujícími tvarování svazku a plynulou změnu rozměru. Výhodou těchto systémů je, že při jednotkové expozici umožňují pokrýt podstatně větší plochu — v porovnání s maximální velikostí plochy exponované jednotkovou expozicí u systému se svazkem kruhového průřezu. U těchto typů, vzhledem k jejich parametrům ale i ceně, převládá průmyslové využití.

Multi-svazkový elektronový litograf byl vyvinut pro polovodičový průmysl na tvorbu *IO* z důvodu dalšího zvýšení rychlosti zápisu při ponechání výhody ultra vysokého rozlišení zápisu (technologie až 20 nm). Příkladem takového zařízení je *MAPPER FLX-1200* [13]. Toto zařízení využívá až 10.000 paralelně jdoucích svazků kruhového průřezu, každý svazek je při tom možné nezávisle řídit (zatemňovat). Zápis velkých ploch je možný rychlostí v řádu až stovek cm^2 za hodinu.

2.3.1.2 Elektronový litograf TESLA BS600

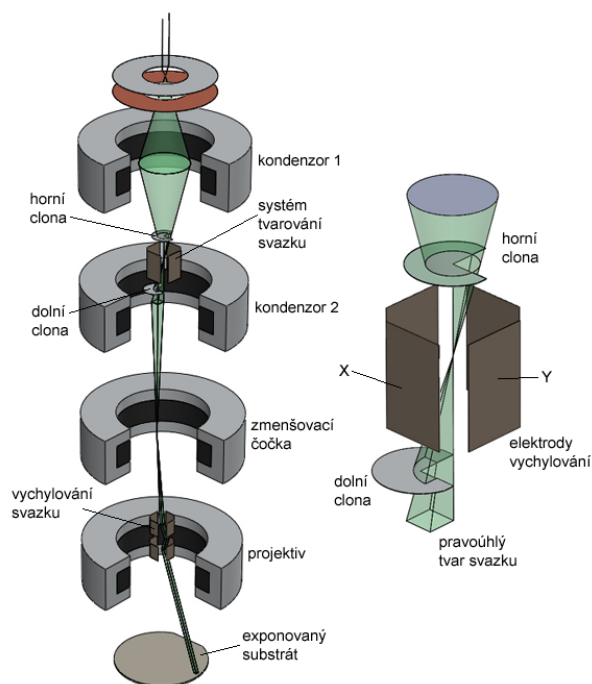
Jedním z elektronových litografů, které byly využity při řešení problematiky technologie přípravy hlubokých struktur, byl systém Tesla BS600, viz Obr. 2.3.2. Tento systém byl vyvinut v 80. letech 20. století na Ústavu přístrojové techniky (ÚPT AV ČR). Vlastní zařízení se skládá z ultravakuové aparatury (*ultra high vacuum*, UHV) obsahující optickou soustavu, dále z litografického stolu, systému řídicí elektroniky a napájecích zdrojů. Optická soustava litografu BS600 je tvořena čtyřmi elektromagnetickými čočkami, modulem elektrostatického tvarování, zatemňováním (z anglického *blanking*) a systémem elektromagnetického vychylování, viz Obr. 2.3.3. Zařízení zapisuje pomocí vektorově rozmítaného pravoúhle tvarovaného svazku proměnných rozměrů [14], [15], [16]. ELG BS600 tedy patří do kategorie VSB litografů.



Obr. 2.3.2 Snímek elektronového litografu Tesla BS600.

Technické parametry tohoto zařízení byly na počátku řešení disertační práce následující:

- Zdroj elektronů: autoemisní (*thermal field emission* – TFE) katoda, W[100] + ZrO₂ (T ≈ 1800 K)
- Urychlovací napětí: pevně 15 kV (energie elektronů 15 keV)
- Proud ve svazku: v ploše 3 μm² asi 30 nA při 15 keV
- Tvar svazku: pravoúhlý proměnný
- Rozměr svazku: proměnný <0,1; 6,3> μm s krokem 50 nm
- Velikost vychylovacího pole: 3,2767 mm v osách X a Y
- Krok vychylování: 50 nm
- Maximální velikost zapsaného vzoru: 100 mm × 100 mm, až 4" substrát (maska, Si deska)
- Přesnost navazování polí: < 1 μm
- Způsob zápisu: Step&Repeat



Obr. 2.3.3 Schéma optické soustavy litografu TESLA BS 600 (vlevo) a detail tvarovacího systému (vpravo), převzato z [17], dle původního[15].

2.3.1.3 Elektronový litograf VISTEC EBPG5000plusES

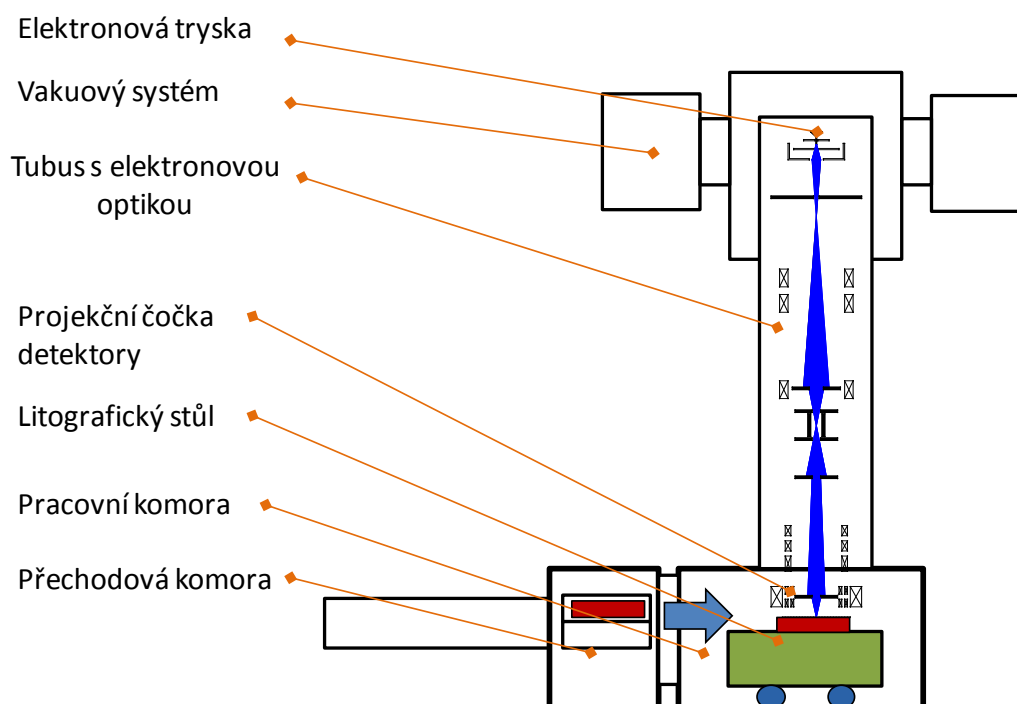
Druhý litografický systém, který byl využit pro část prací při řešení tématu disertační práce, byl systém VISTEC EBPG5000plusES, schematicky pospaný na Obr. 2.3.5. Jedná se o komerční poloprůmyslový ELG zakoupený v roce 2012 na Ústav přístrojové techniky (ÚPT AV ČR), v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/01.0017 ALISI. Typově se jedná systém s gaussovským svazkem, který umožňuje kontinuální změnu rozměru svazku a proudu ve svazku. Zařízení vykazuje výjimečnou přesnost a stabilitu umožňující zápis struktur s rozměry menšími než 100 nm. Zápis obrazových podkladů po velké ploše je zajištěn přesným litografickým stolem řízeným interferometrem.



Obr. 2.3.4 Snímek elektronového litografu VISTEC EBPG5000plusES.

Technické parametry zařízení jsou následující:

- Zdroj elektronů: Schottky (TFE) katoda
- Urychlovací napětí: 50 kV; 100 kV (energie e^- 50/100 keV)
- Proud ve svazku: 100 pA - 100 nA
- Tvar svazku: bodový svazek
- Rozměr svazku: proměnný 8-150 nm
- Velikost vychylovacího pole: 262,144 μm x 262,114 μm @ 100 kV
- Krok vychylování: 0,08 nm - 0,5 nm
- Rychlost vychylování: 500 Hz - 25 MHz
- Maximální velikost zapsaného vzoru: 155 mm \times 155 mm, až 6" substrát (maska, Si deska)
- Přesnost navazování polí: < 20 nm
- Způsob zápisu: Step&Repeat



Obr. 2.3.5 Blokové schéma systému VISTEC EBPG5000plusES (vlevo), blokové schéma optického systému (vpravo).

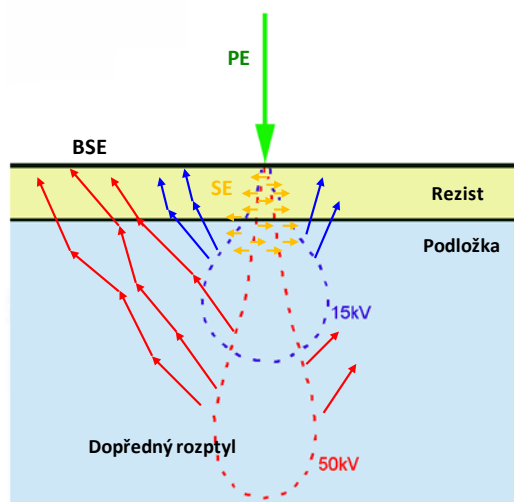
2.3.2 Fyzikální princip elektronové litografie

Elektronová litografie (EBL) je soubor chemicko-fyzikálních metod pro opracování vybraných částí povrchů. Při EBL jsou využívány netermické interakce svazku urychlených částic elektronů s vrstvou vhodné látky – elektronového rezistu [14]. Interakcemi elektronů procházejících látkou dochází vlivem pružných a nepružných srážek elektronů s molekulami pevné látky k přenosu energie do ozařované látky a tvorbě latentního obrazu. Významnou roli v EBL hrají rozptylové jevy, ke kterým dochází při interakci urychlených částic elektronů v elektronovém svazku s rezistem nebo podložkou rezist nesoucí.

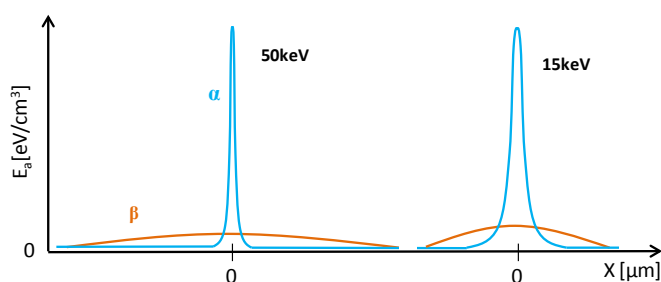
2.3.2.1 Rozptylové jevy

Ačkoliv většina komerčně dostupných ELG umožňuje zaostření svazku do stopy o velikosti jednotek nanometrů, rozptylové jevy limitují výslednou velikost zapsaného motivu [11]. Jak fokusovaný elektronový svazek proniká rezistem, dochází k mnoha událostem, které vychylují dráhu letu elektronů pod malým úhlem, tyto jevy jsou označovány jako dopředný rozptyl (z anglického *forward scattering*). Svazek urychlených elektronů proniká dále přes rezist do podložky a dochází k dalším rozptylovým událostem, které vychylují dráhu letu elektronů pod vysokým úhlem, tyto jevy se označují jako zpětný rozptyl resp. rozptyl zpětně odražených elektronů (z anglického *backscattering*, resp. *back scattered electrons*, BSE) [2], [3], [7], [11].

Během celého procesu dochází ke kontinuálnímu brzdění kinetické energie primárních elektronů (PE), při současné kaskádové generaci nízko energetických elektronů zvaných sekundární elektrony (SE). Výsledný energetický profil absorbované energie, který určuje charakter zapsaného obrazu, je dán kombinací dopředného a zpětného rozptylu, tato kombinace je většinou modelována jako systém dvou gaussovských funkcí, viz Obr. 2.3.6 a Obr. 2.3.7.



Obr. 2.3.6 Schematické znázornění rozptylových jevů při průchodu PE pevnou látkou.



Obr. 2.3.7 Příklady energetických profilů absorbované energie složené ze dvou Gaussových funkcí pro dopředný rozptyl a rozptyl BSE pro dvě různé energie PE.

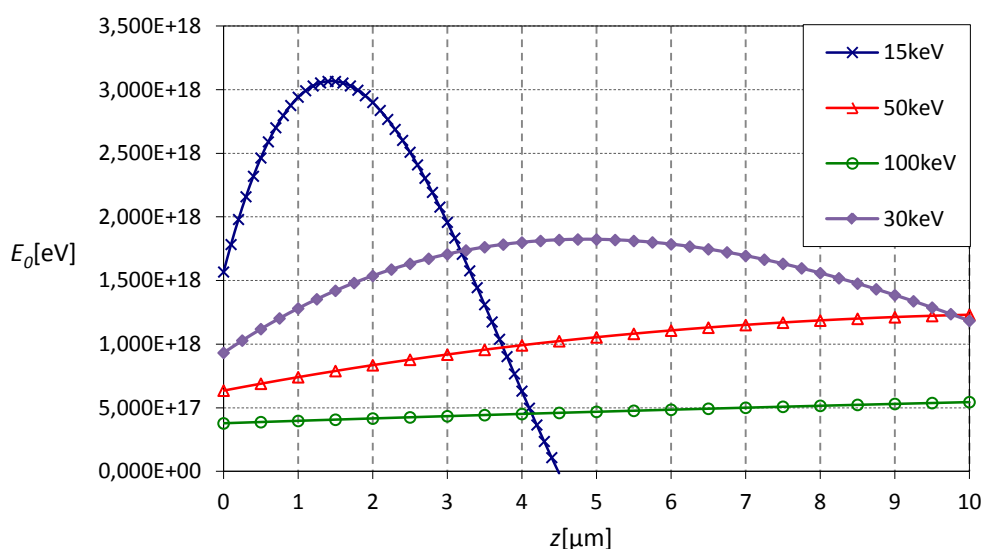
2.3.2.2 Dopředný rozptyl

Jak již bylo psáno v úvodu, dopředný rozptyl je způsoben interakcemi PE s pevnou látkou, když dochází k odchylce dráhy letu o malý úhel. Tento fakt vede k rozšiřování efektivního průměru svazku směrem od povrchu rezistu k podložce, tzv. laterální rozptyl.

Dopředný rozptyl je také někdy popisován jako závislost hustoty absorbované energie E_a na penetrační hloubce z [14]. Hustota absorbované energie je v látce popsána vztahem:

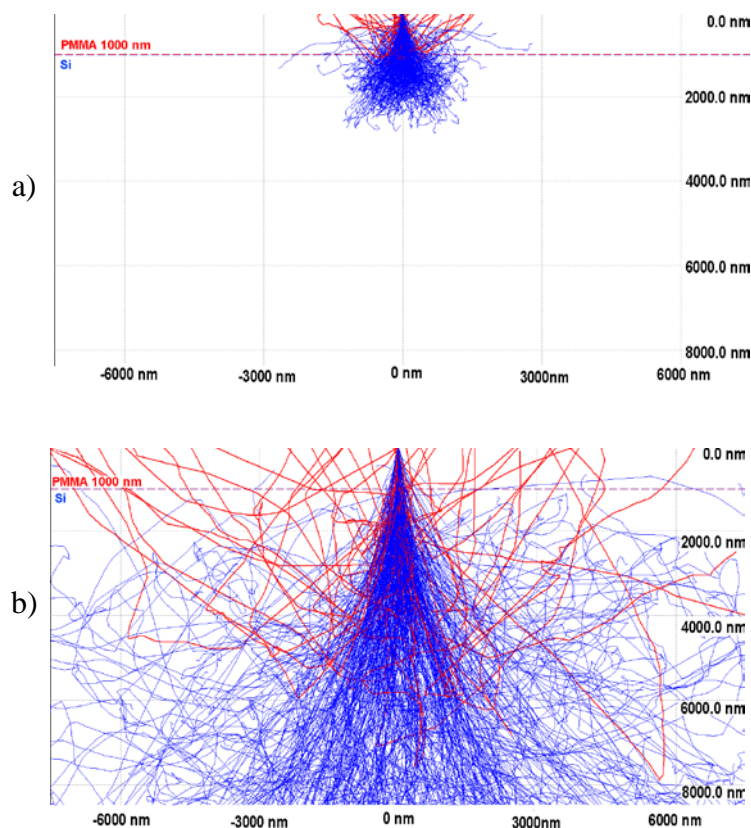
$$E_a = \frac{Q \cdot E_0}{e \cdot R_g} \lambda(f), [eV \cdot cm^{-3}]. \quad (2.3.1)$$

V této rovnici je Q expoziční dávka [$C \cdot cm^{-2}$], E_0 je primární energie elektronů (daná urychlovacím napětím) [eV], e je elementární náboj elektronu, R_g je dolet elektronů v dané látce (tzv. Grünův dolet) v [cm] a $\lambda(f)$ je polynomická funkce vyjadřující poměr hloubky a dávky pomocí normalizovaného průniku $f = z / R_g$.



Obr. 2.3.8 Závislost absorbované energie v rezistu (PMMA) na penetrační hloubce elektronů při expoziční dávce $10 \mu C/cm^2$ pro kinetické energie elektronů 15; 30; 50 a 100 keV.

Z pohledu technologie EBL lze z této závislosti vyvodit dva poznatky. Prvním poznatkem je, že pro expozice elektrony s nižší kinetickou energií bude hustota absorbované energie vyšší než pro elektrony s vyšší kinetickou energií. To znamená, že pro ozáření elektrony s nižší kinetickou energií na stejnou úroveň postačí kratší expoziční čas. Druhým poznatkem je silná nelinearita průběhu závislosti hustoty absorbované energie na penetrační hloubce. To znamená, že pro nízké kinetické energie elektronů ve svazku může být nutná optimalizace času ozáření podle požadované hloubky struktury. Zvláště v případě přípravy hlubších struktur může tento fakt hrát významnou roli.



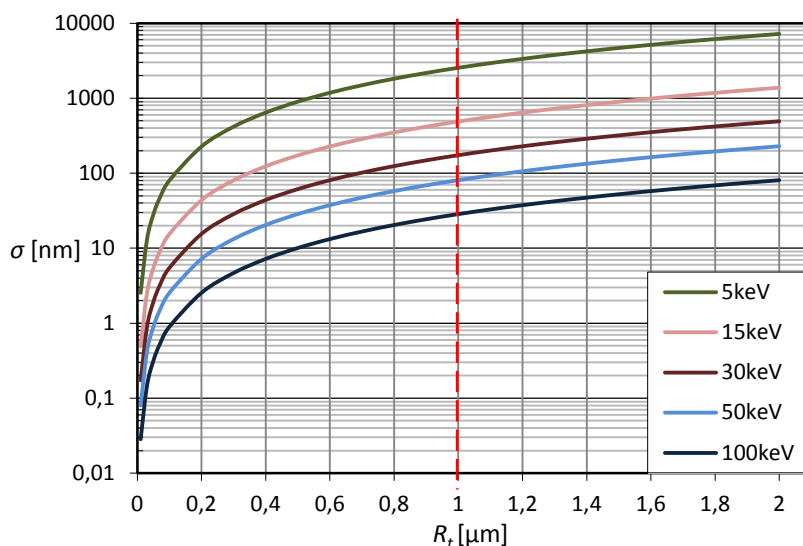
Obr. 2.3.9 Simulace Monte Carlo rozptylových jevů v rezistu PMMA ($w = 1000$ nm) na křemíkové desce při energii PE a) 15 keV; b) 50 keV. [CASINO - Monte Carlo Simulation of electron trajectories in solids]

Z hlediska dosažitelného rozlišení zápisu hraje důležitou roli již zmíněný laterální rozptyl. Ačkoliv neexistuje matematický model přesně popisující laterální rozptyl, je pro analýzu možné využít statistickou metodu modelování Monte Carlo (viz Obr. 2.3.9), která umožňuje modelování tras elektronů v předem definovaném typu vrstev. Lze tak získání dobrou představu, k jak silnému rozptylu elektronů bude pro studovaný materiál docházet.

Další možnost, která může pomoci při stanovení rozlišení zápisu (resp. při analýze vlivu dopředného rozptylu na laterální rozšíření elektronového svazku), je využití matematické funkce popisující závislost efektivního průřezu svazku σ na penetrační hloubce:

$$\sigma = 0,9(R_t/E_0)^{1,5}, \quad (2.3.2)$$

kde R_t je tloušťka rezistu v nanometrech a E_0 je energie elektronů v keV. Po vynesení této závislosti do grafu pro různá urychlovací napětí (Obr. 2.3.10) je patrné, že redukce dopředného rozptylu (tj. zvýšení rozlišení zápisu) lze dosáhnout dvěma způsoby. Jednou možností je volba velice tenkých vrstev rezistu. Druhou možností je využití elektronů s vysokou kinetickou energií, kdy dopředný rozptyl není ve vyšších penetračních hloubkách tak markantní. Je třeba mít na paměti, že u EBL hrají roli i další vlivy související například s vlastnostmi rezistů a vývojek; tento empirický model – tedy předchozí rovnici – je tedy třeba brát pouze orientačně pro odhad chování zápisu do rezistu dané tloušťky.



Obr. 2.3.10 Závislost efektivního průřezu svazku elektronů na tloušťce rezistu pro elektrony s kinetickou energií 5; 15; 30; 50 a 100 keV.

2.3.2.3 Zpětně odražené elektrony

Zpětně odražené elektrony (BSE) vznikají z rozptylových interakcí, při kterých dochází k změně dráhy PE pod vysokým úhlem. K těmto interakcím dochází nejčastěji při přechodu elektronů z rezistu do materiálu podložky, tj. ve vyšších penetračních hloubkách. Při těchto interakcích může dojít až k obrácení dráhy těchto elektronů, které tak mohou ze substrátu pronikat zpět do rezistu. V závislosti na energii PE to může být ve velkých vzdálenostech od místa dopadu fokusovaného svazku (řádově i v jednotkách až desítkách mikronů). Tyto elektrony způsobují dodatečnou expozici rezistu v oblasti jimi zasažené, což nazýváme jev blízkosti elektronového svazku (*electron beam proximity effect*, EBPE) [2]. Zápisem objektu v jedné oblasti se tedy zvyšuje expoziční dávka objektu v sousední oblasti.

Vzdálenost, do které mohou BSE putovat, než ztratí veškerou svou kinetickou energii, je závislá na energii PE a typu materiálu podložky. Materiálový faktor popsáný bezrozměrnou konstantou η , definuje poměr energie absorbované z PE a z BSE. Tento faktor je nezávislý na energii PE a závisí na typu materiálu podložky. Obecně platí, že u materiálů s nízkým protonovým číslem dochází k emitaci menšího množství BSE. U materiálů s vyšším protonovým číslem tento poměr naopak roste. Pro případ křemíku se udává hodnota $\eta = 0,17$ [2].

2.3.2.4 Sekundární elektrony

Sekundární elektrony (SE) jsou nízkoenergieové elektrony s energií od 2 do 50 eV. Tyto elektrony jsou produktem neelastických srážek vysokoenergieových elektronů (PE a BSE) v průběhu jejich putování pevnou látkou při současně ztrátě kinetické energie (brzdění). SE mají vzhledem k velmi nízké energii jen velmi krátkou dráhu letu, řádově jednotky nanometrů. Mají tedy jen zanedbatelný vliv na změnu rozměru zapisované struktury (např. jejího rozšíření). Dosah SE může přinášet omezení v případě, kdy se jedná o zápis prvků

s rozměry v oblasti srovnatelné s délkou dráhy SE (oblasti kolem 10 nm). Z hlediska funkce jsou SE odpovědné za objemovou expozici materiálu (rezistu).

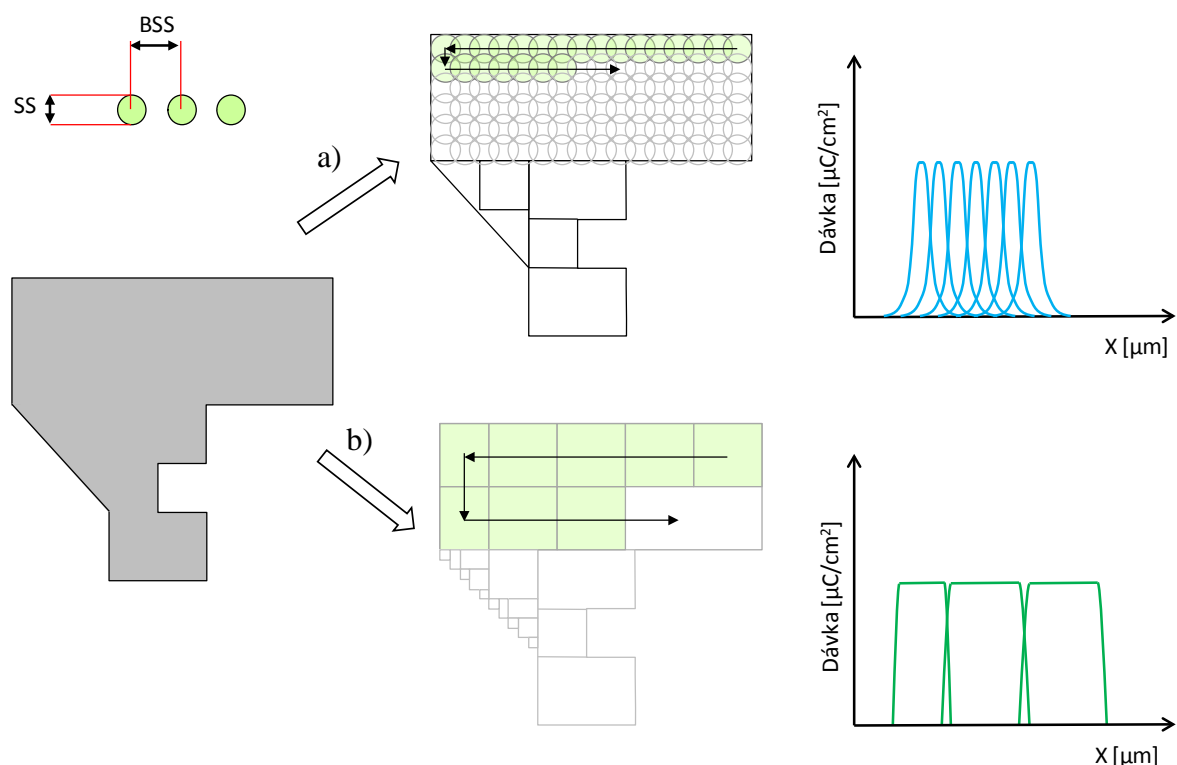
Malá část SE může dosahovat vyšších energií v řádu až jednotek keV. Tyto elektrony, někdy nazývané jako rychlé sekundární elektrony (z anglického *fast secondary electrons*, FSE), mohou přispívat k rozšiřování velikosti exponovaného prvku. V případě potřeby je lze zahrnout i do simulace distribuce absorbované energie přidáním třetí gaussovske funkce [2].

2.3.3 Přenos obrazu do rezistu přímou expozicí

Při přenosu obrazu do rezistu pomocí přímého zápisu elektronovým svazkem se využívá několik operací. První operací bývá fragmentace obrazu do menších obdélníkových nebo trojúhelníkových ploch, nebo do trapezoidů. Další operací je zápis jednotlivých ploch vektorovým nebo rastrovacím způsobem zápisu. Samotná strategie zápisu závisí na typu ELG.

2.3.3.1 Strategie zápisu

V případě ELG pracujícího se svazkem s kruhového tvaru (např. EBPG VISTEC) je pro každý obrazový objekt vygenerován soubor pozic svazku, po kterých se při zápisu elektronový svazek pohybuje (rastruje). Před generací souboru pozic svazku je nutné definovat pravidla vyplňování ploch, a to pomocí dvou parametrů: velikost svazku (z anglického *spot size*, parametr *SS*) a rozteč středů svazku (z anglického *beam step size*, parametr *BSS*), viz Obr. 2.3.11.



Obr. 2.3.11 Princip strategie zápisu obrazového prvku v ELG (vlevo): a) zápis bodovým svazkem kruhového tvaru; b) zápis proměnným tvarovaným svazkem obdélníkového tvaru. Distribuce absorbované energie (dávky) pro oba typy zařízení (vpravo).

V případě ELG pracujícího s pravoúhle tvarovaným svazkem proměnných rozměrů (např. Tesla BS600) je strategie zápisu založena na rozdělení obrazového objektu do souboru pozic razítek, tedy jednoho záblesku svazku elektronů definovaného tvaru a rozměru. Způsob vyplňování ploch obrazu i volba rozměru a tvaru jsou předem definovány pravidly, které stanovuje operátor (případně programátor zařízení). Následuje rastrový nebo vektorový zápis razítek na tyto pozice. Výhodou této strategie je vyšší rychlost zápisu, díky vyšší efektivitě při zápisu ploch. Ve srovnání se zápisem kruhovým svazkem je třeba menší počet jednotkových expozic.

Expoziční dávka přenesená do exponované plochy je v obou případech dána součtem dávek z jednotkových expozic a dávek obdržných vlivem rozptylových jevů. Na systém s tvarovaným svazem bývají dodatečné nároky spojené s nutností vysoké homogenity proudové hustoty v ploše tvarovaného svazku (razítka).

Výše dávky ozáření, vzhledem k tomu že optické soustavy ELG neumožňují rychlou změnu proudu, je modulována délkou doby působení elektronového svazku. Pro stanovení dávky ozáření D lze vycházet ze vztahu:

$$D = I_{SV} \cdot \tau . \quad (2.3.3)$$

Zde je I_{SV} proudová hustota ve svazku v $[A/cm^2]$ a τ je doba působení svazku v $[\mu s]$. V případě, že pro zápis daného obrazu známe potřebnou dávku ozáření, velikost proudu ve svazku I_{SV} , délku zatemňovacího času (*blanking time*) τ_{BL} v $[\mu s]$ a celkový počet jednotkových expozic N_E (údaj ze simulátoru obrazu), lze odhadnout celkovou dobu zápisu t_E [hod]:

$$t_E = \frac{\left(\frac{D}{I_{SV}} + \tau_{BL} \right) \cdot N_E}{3,6 \cdot 10^9} . \quad (2.3.4)$$

Vzorec neuvažuje čas nutný na přesun stolku mezi jednotlivými expozičními poli (neboť tyto časy se mohou systém od systému značně lišit), nicméně i tak může dávat dobrou představu o celkové době nutné pro zápis daného obrazu.

Rychlost zápisu r_E $[cm^2/h]$ získáme z podílu celkové doby zápisu a celkové velikosti exponované plochy S_E $[cm^2]$.

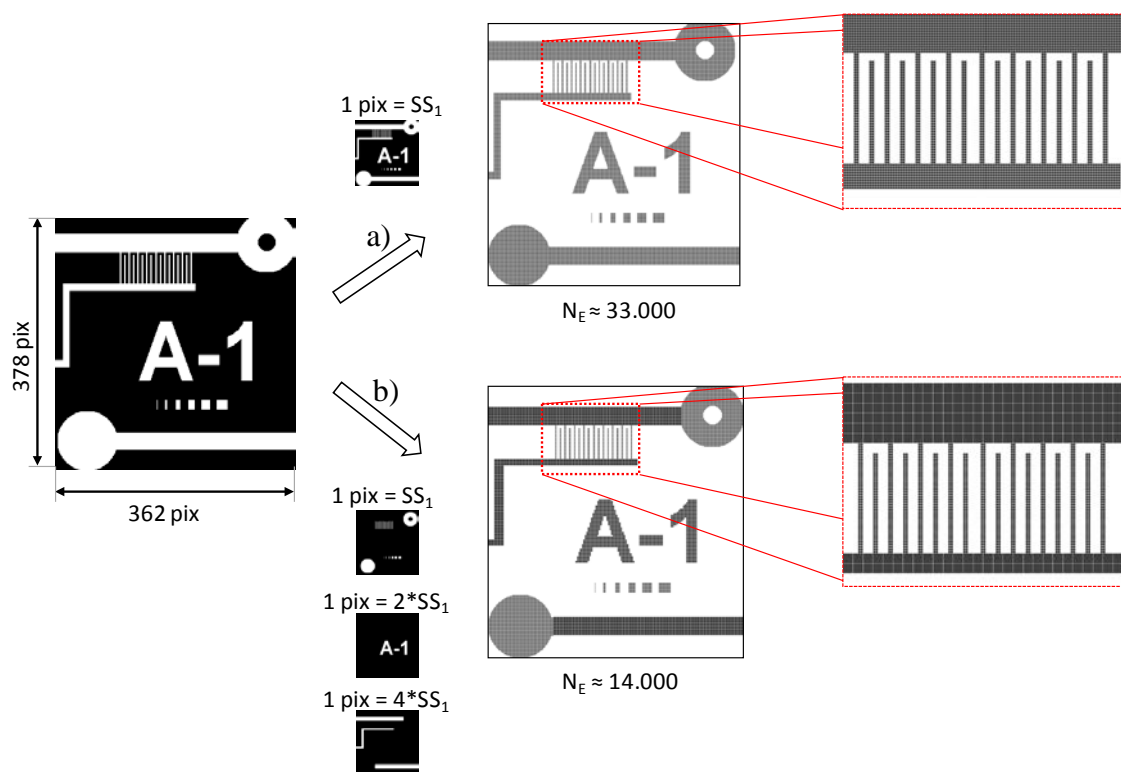
$$r_E = \frac{S_E}{t_E} . \quad (2.3.5)$$

Rychlost zápisu lze ovlivnit zvýšením emise elektronů z katody, čímž dojde ke zvýšení proudové hustoty ve svazku. Druhou možností, jak zvýšit rychlost zápisu, je volbou systému rezistu a vývojky s vyšší citlivostí (tj. snížením požadované dávky ozáření). V případě ELG umožňující změnu rozměru svazku lze ovlivnit rychlost zápisu zvýšením rozměru svazku, tj. hodnot parametrů SS a BSS . Tak může dojít ke snížení celkového počtu jednotkových expozic nutných k vykreslení obrazu při současném zvýšení rychlosti zápisu.

2.3.3.2 Datová příprava v programovém prostředí Expo.NET

Programové prostředí Expo.NET plní u ELG BS600 roli simulátoru zapisovaného obrazu, překladače dat do strojových instrukcí a kontroléru řídicího proces expozice. Převod obrazových podkladů a expozičních dat je prováděn v dedikovaném programovacím jazyku ASBEST (Assembler B-stupně řídicího systému IRS). Prostředí simulátoru Expo.NET umožňuje na vstupu pracovat s různými způsoby definice obrazových dat jako je datová bitmapa, binární datový soubor nebo textové instrukce.

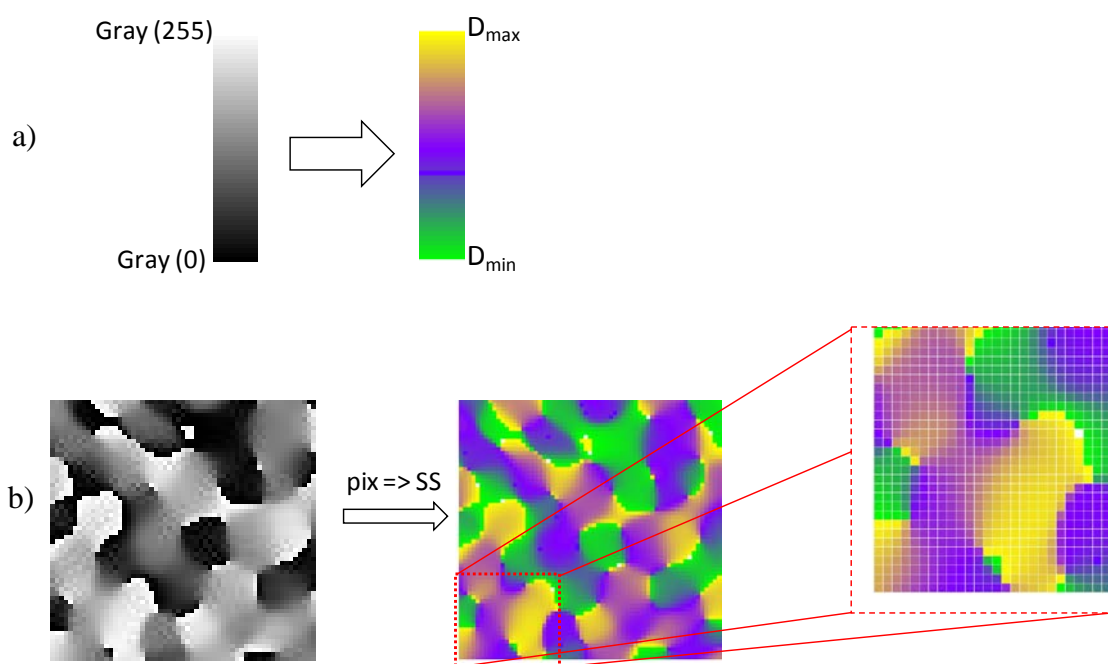
První a nejjednodušší způsob tvorby datových souborů je přímá konverze černobílé (*black&white*, B/W) datové bitmapy, viz Obr. 2.3.12. Tento způsob zadání se používá například při datové přípravě a záznamu binárního typu struktur. Při generaci strojových dat se vychází z principu substituce každého grafického bodu (pixelu) datové bitmapy za jednotkovou expozici svazkem o rozměru SS . Při datové konverzi se překladač řídí jednoduchým pravidlem, že pixely bitmapy s indexem o hodnotě 0 (černá) reprezentují neexponované oblasti, naopak pixely bitmapy s indexem o hodnotě 1 (bílá) odpovídají exponovanému oblaku. Hlavní výhodou tohoto způsobu datové přípravy je snadná konverze prakticky jakýchkoliv grafických souborů na dávkový expoziční soubor. Nevýhodou tohoto způsobu přípravy je menší flexibilita převodního algoritmu, z důvodů pevné konverze pixelů na jednu velikost SS . Pro komplexnější obrazové podklady, které obsahují například současně velké plochy i jemné detaily, tedy není příliš výhodná, protože je nutné zvolit takovou hodnotu SS , aby bylo možné správně interpretovat nejmenší obrazový detail. Jisté řešení skýtá možnost rozdělit grafické podklady datové bitmapy do několika samostatných datových bitmap, resp. vrstev, s různou velikostí detailů.



Obr. 2.3.12 Příklad přímé konverze B/W datové bitmapy na binární expoziční data, při použití: a) jedné bitmapy; b) tří bitmap.

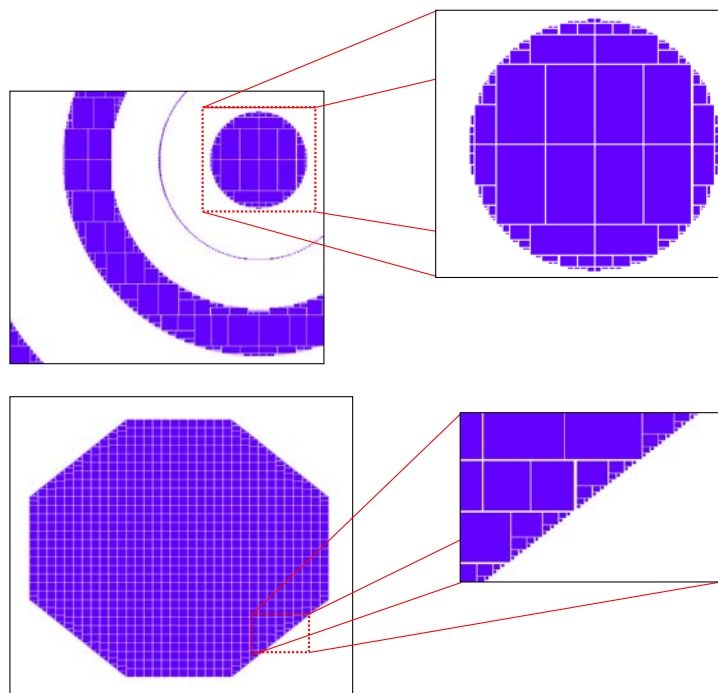
Hlavní problém při přímé konverzi obrazu z datové bitmapy spočívá v tom, že pro hodnoty parametru SS v submikronové oblasti může být datová bitmapa obrazu pro zpracování příliš velká. Např. pro zápis plochy čtverce $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ je při $SS = 0,1\text{ }\mu\text{m}$ nutná bitmapa o velikosti $(20\,000 \times 20\,000)$ pixelů.

Druhý typ konverze využívá na vstupu překladače datové bitmapy v úrovních šedi (gray scale), viz Obr. 2.3.13. Podobně jako v prvním případě je každý pixel bitmapy převeden na jednotkovou expozici s pevně definovaným rozměrem SS . Současně dochází ke kontrole indexu (hodnoty šedi) jednotlivých pixelů. Podle dané úrovně je přiřazena programová expoziční dávka (např. z rozsahu 1 až 255 %). Pro šed' s hodnotou indexu 0 platí, že se neexponuje.



Obr. 2.3.13 Příklad konverze šedé datové bitmapy na expoziční data pro 3D litografii: a) převod gradientu šedi na gradient dávky; b) převod obrazu šedé datové bitmapy s motivem LRI (Laser Readable image) na expoziční data s dávkovým gradientem.

Třetí způsob přípravy umožňuje tvorbu expozičních dat pomocí sady textových instrukcí programu ASBEST pro vektorový zápis, viz Obr. 2.3.14. Pomocí těchto instrukcí lze definovat základní tvary, tedy například obdélník, kruh, prstenec, trojúhelník atd. Případně je možné přímo definovat objekt po jednotlivých expozičních bodech. Tento způsob je oproti konverzi z bitmapy podstatně složitější na přípravu, ale umožňuje větší volnost při návrhu motivů resp. objektů. Umožňuje například použití různých velikostí SS v rámci exponovaného tvaru podle programátorem definovaných pravidel, dále umožňuje například modifikaci expozičních dávek ve vybraných částech objektu. Navíc díky textovému zadání je po datové stránce méně výpočetně náročný než konverze z datových bitmap.



Obr. 2.3.14 Příklad definice některých typů obrazu pomocí textových objektových instrukcí jazyka ASBEST pro vektorový zápis.

Jak je patrné, v expozičním programu Expo.NET je obzvlášť propracovaná tvorba a konverze datových vstupů pro přípravu binárních reliéfních struktur. To je dáno faktem, že přístroj ELG BS600 byl původně konstruován pro tvorbu masek pro výrobu IO.

Jednoduchá konverze z bitmap nemusí být pro všechny typy aplikací vždy ideálním řešením, například z důvodu nutnosti úpravy dávek při kompenzaci jevu blízkosti nebo v případě tvorby některých typů víceúrovňových struktur. Datová příprava pomocí textových instrukcí umožňuje operátorovi maximální volnost při nastavování parametrů, nicméně pro komplexnější designy může být příprava podkladů zdlouhavá. Kompromisem mezi oběma způsoby je vytvoření překladače, jenž na vstupu využívá zadání tvaru pomocí datové bitmapy, která je automaticky rozřezána do bloků, které jsou následně vyplněny pomocí předem stanovených pravidel (rozsah použitých SS) pomocí základních textových instrukcí a následný převod bloků těchto instrukcí do binárních datových souborů. Možná a výhodná je i kombinace datové přípravy s objekty definovanými pomocí datové bitmapy a s objekty definovanými textovými instrukcemi.

2.3.4 Elektronové rezisty

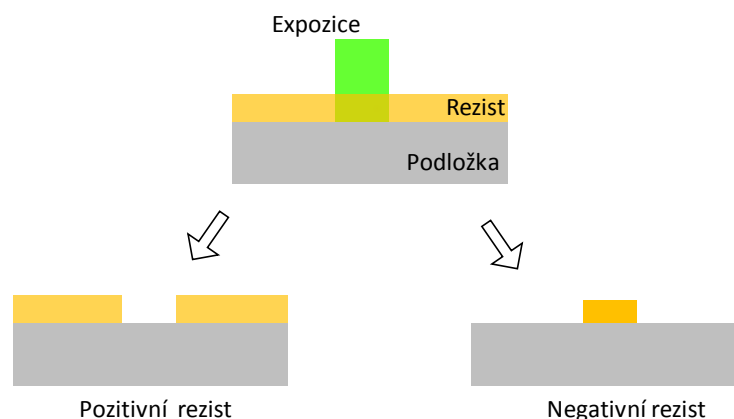
Elektronové rezisty lze podle složení rozdělit do dvou kategorií: organické a anorganické. Hlavním rozdílem je, že v případě anorganických rezistů je princip expozice založen přímo na interakci vysokoenergiových elektronů (PE, BSE), kdežto organické rezisty jsou založeny na principu chemické modifikace působením nízkoenergiových SE [21].

Elektronové rezisty lze stejně jako fotorezisty charakterizovat pomocí několika hlavních parametrů: tón, citlivost, kontrast, rozlišení, leptací odolnost, teplota skelného přechodu, případně tepelná degradace.

U rezistu rozlišujeme pozitivní a negativní tón. Tón rezistu udává, jaká část rezistu se během procesu vyvolání rezistu odstraní. V případě pozitivního tónu se odstraní exponovaná část obrazu, v případě negativního je tomu právě naopak. Citlivost rezistu udává minimální hodnotu dávky, která vede k selektivnímu rozpouštění v průběhu vyvolávání. Kontrast rezistu γ udává sklon křivky citlivosti. Parametr rozlišení definuje velikost MFS, případně nejmenší vzdálenost dvou prvků, které budou po vyvolání rezistu rozlišitelné. Leptací odolnost udává, jakou rychlostí bude docházet k rozpouštění nebo leptání rezistu při procesech mokrého nebo suchého leptání. Teplota skleného přechodu a degradace udává podmínky sušení rezistu po nanesení z tekutého prekursoru a odolnost rezistu při jeho tepelné zátěži.

2.3.4.1 Organické rezisty

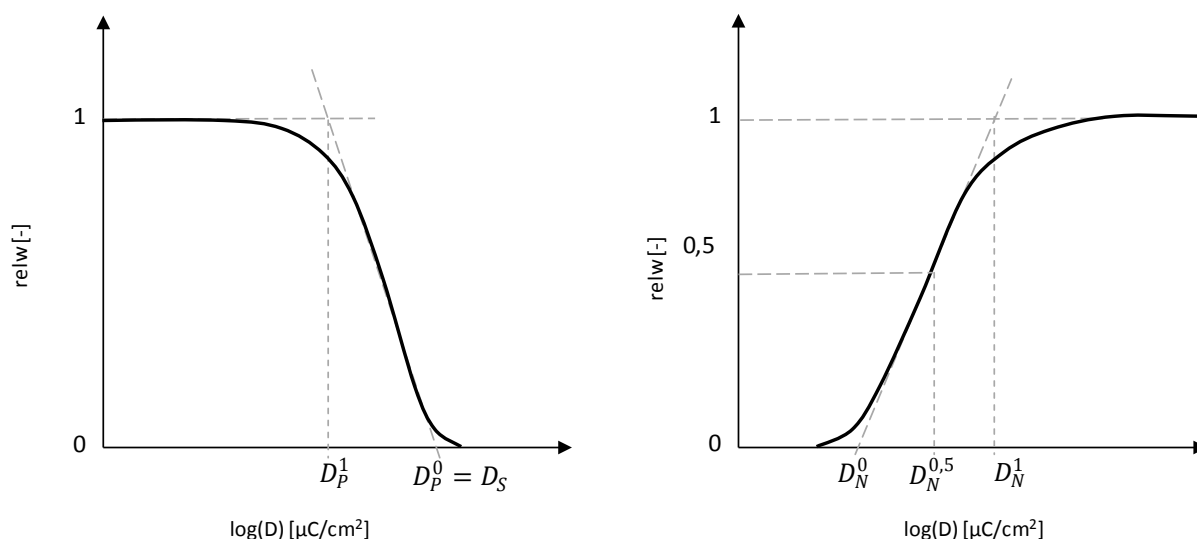
Pro záznam obrazových informací se v EBL využívají nejčastěji organické rezisty. Výsledkem interakce elektronů s vrstvou organického polymerního materiálu jsou buď degradační nebo síťovací procesy [2], [14], [15], [16], [17], [19]. V případě, že u rezistu převládají degradační procesy (rozbíjení vazeb makromolekul polymeru a tvorba fragmentů polymeru s nižší molární hmotností) mluvíme o pozitivním rezistu. Pro případ, že v rezistu převládají síťovací procesy, mluvíme o negativním rezistu. U tohoto typu rezistu dochází působením elektronů k síťovacím procesům, kdy v oblasti působení elektronového svazku dochází ozářením molekul rezistu k tvorbě trojrozměrné sítě způsobující nárůst molární hmotnosti polymeru. Oblast, ve které došlo k vytvoření trojrozměrné sítě, má následně nižší rozpustnost než oblast nevystavená působení elektronů. Některé polymerní látky mohou vykazovat obojí chování (pozitivní i negativní) v závislosti na dávce ozáření elektrony nebo na způsobu zpracování po expozici (např. tepelného zpracování).



Obr. 2.3.15 Pozitivní a negativní rezist z pohledu litografie.

Charakteristiku chování rezistu z litografického hlediska popisuje křivka citlivosti, viz Obr. 2.3.16. Tato křivka udává chování dané soustavy rezist – vývojka [14] a popisuje závislost relativního úbytku rezistu $relw$ působením vývojky na logaritmu dávky ozáření $\log(D)$, při dané délce a teplotě vyvolávání. Konstrukce křivky citlivosti rezistu je většinou možná na základě experimentálně získaných dat z měření, bezkontaktní nebo kontaktní optickou

profilometrií, na reliéfní struktuře zaznamenané v rezistu s různými expozičními dávkami (dávkovým gradientem).



Obr. 2.3.16 Křivka citlivosti pro pozitivní rezist (vlevo) a negativní rezist (vpravo).

Ze sestavené křivky citlivosti lze odečíst některé základní parametry charakterizující vlastnosti rezistu:

Pro pozitivní rezist jsou to tyto parametry:

D_S – čistící dávka, to jest expoziční dávka, při které dojde k rozpuštění celého objemu rezistu, někdy označovaná také jako "citlivost rezistu" S ;

D_P^I – extrapolovaná dávka;

γ – kontrast rezistu definovaný absolutní hodnotou směrnice lineární části křivky citlivosti.

Pro negativní rezist jsou to tyto parametry:

$D_N^{0,5}$ – citlivost rezistu definovaná jako dávka ozáření, při které zůstane po vyvolávání polovina výchozí tloušťky rezistu ($relw = 0,5$);

D_N^0 – dávka ozáření pro bod gelace, což je dávka, při které vznikne v rezistu troj-rozměrná síť;

D_N^I – extrapolovaná dávka;

γ – kontrast rezistu.

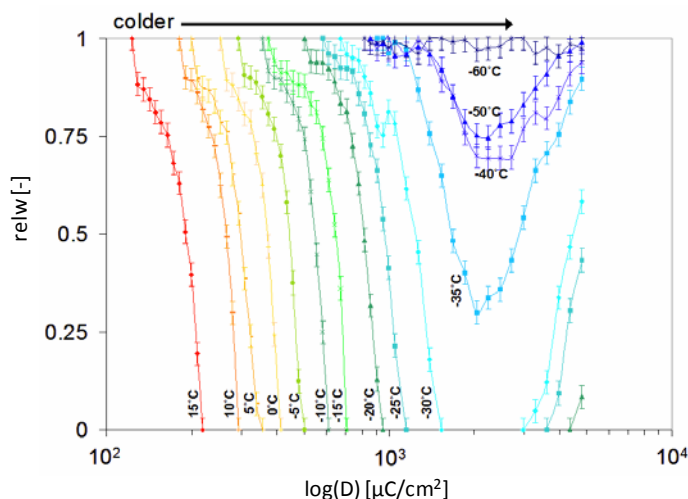
Kontrast rezistu je bezrozměrná veličina, která je definována jako sklon přímky (linearizované části křivky citlivosti) proložené mezi dvěma body. V případě pozitivního rezistu jsou body odpovídající čistící dávce D_S a extrapolované dávce D_P^I . K výpočtu kontrastu pozitivního rezistu lze použít následující vztah:

$$\gamma = \left| \log \frac{D_P^1}{D_P^0} \right|^{-1}, \quad (2.3.6)$$

zatímco pro výpočet kontrastu negativního rezistu platí obdobný vztah:

$$\gamma = \left| \log \frac{D_N^0}{D_N^1} \right|^{-1}. \quad (2.3.7)$$

V případě tvorby binárních reliéfů je vhodné, aby hodnota kontrastu měla co nejvyšší hodnotu, tj. vysoká strmost linearizované části křivky citlivosti. Tím je zajištěno, že poměr rozpouštění mezi exponovanou a neexponovanou částí rezistu bude při procesu vyvolávání vysoký. Hodnota kontrastu rezistu do jisté míry ovlivňuje výsledný tvar binárního reliéfu, velikost MFS a strmost hran zapsaných prvků. Vysokého kontrastu rezistu lze dosáhnout vhodnou volbou systému rezist – vývojka, případně podmínkami vyvolávání. Pro minimalizaci vlivu EBPE (*electron beam proximity effect*) je vhodné, aby vyvolávání pozitivního rezistu probíhalo co nejméně agresivně, tj. nízkou rychlostí. Tím lze zajistit snížení rozpouštěcí rychlosti v oblastech navazujících na exponovaný prvek a redukovat vliv rozptylových jevů. Typické hodnoty kontrastu rezistu jsou pro pozitivní rezisty v oblasti mezi 2 – 10 a pro negativní rezisty 1 – 3. Například pro jeden v EBL z nejběžněji používaných pozitivních rezistů *polymethylmethakrylát* (PMMA) lze při použití konvenční vývojky složené z *methyloisobutylketonu* (MBIK) a *isopropylalkoholu* (IPA) dosáhnout hodnoty kontrastu od 2 do 8, v závislosti na poměru obou složek. Při snížení teploty procesu vyvolávání, tzv. studené vyvolávání, kdy se teploty vyvolávání pohybují od 10 °C do -30 °C lze dosáhnout ještě vyššího kontrastu, avšak za cenu posunu hranice citlivosti, viz Obr. 2.3.17.



Obr. 2.3.17 Příklad experimentálně změřených křivek citlivosti systému rezistu PMMA a vývojky MBIK:IPA (1:3) pro různé teploty vyvolávání zaznamenaných na ELG Raith-150SEBL @ 30 keV, převzato z [21].

Do odlišné situace se dostáváme v případě, že chceme pomocí EBL v rezistu vytvořit víceúrovňové struktury, tzv. 3D („šedou“) litografií. V tomto případě je výhodnější, aby křivka citlivosti použitého systému rezist – vývojka měla nižší hodnotu kontrastu, ideálně

v oblasti kolem hodnoty $\gamma = 1$. Důvodem je jednodušší nastavování expozičních dávek pro jednotlivé části struktury a širší pracovní okno.

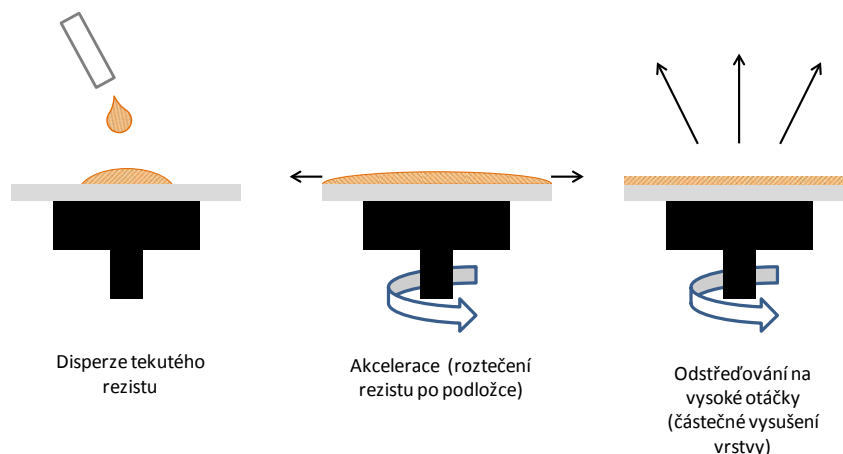
Příklad srovnání některých typů organických rezistů používaných v EBL a jejich vlastností uvádí Tab. 2.3.1.

Tab. 2.3.1 Tabulka některých komerčně dostupných rezistů používaných v EBL, dle [2], [50], [51], [52], [53].

Rezist	Typ	Rozlišení [nm]	Citlivost [$\mu\text{C}/\text{cm}^2$]	Vývojka	Výrobce
PMMA MW950k	Pozitivní	10	200-500 @ 50 keV 50-100 @ 15 keV	IPA:H ₂ O MBIK:IPA	MicroChem
EBR-9	Pozitivní	200	10 @ 20 keV	MBIK:IPA	Toray Inc.
ZEP 520	Pozitivní	>100	80 @ 50 keV	IPA:H ₂ O*	MicroChem
ZEP7000B	Pozitivní	75	55 @ 20 keV	ZED-RD**	ZEON Corp
AZ5206	Pozitivní	250	6 @ 10 keV	MIF726*	AZ resist
AR-P 6200 (CSAR 62)	Pozitivní	6	65 @ 30 keV	AR 600-546	MicroChem
COP	Negativní	1000	0,3 @ 10 keV	MEK:eth.	MicroChem
SAL606	Negativní	100	8,4 @ 40 keV	MF312:H ₂ O	SChA (?)
UV5 - Photoresist	Negativní	200	10 @ 50 keV	MF322	Shipley Co.
CAR-44-05	Negativní	1000	5 -10 @15 keV	MIF726*	Allresist
SU-8 (2005)	Negativní	1000	3 @15 keV	PGMEA	MicroChem

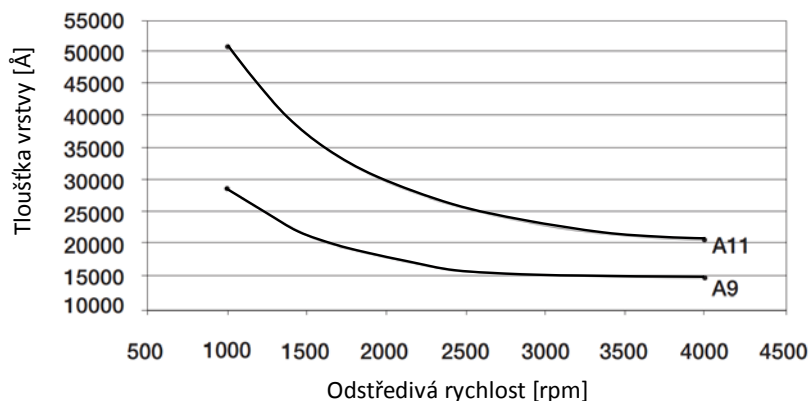
2.3.4.2 Depozice rezistů

Organické rezisty mají před nanesením na podložku nejčastěji formu tekutého prekurzoru skládajícího se z polymerní látky rozpuštěné ve vhodném rozpouštědle. Metody nanášení rezistu jsou různé, nejběžnější metoda je nanesení kapky (jednotky ml) tekuté formy rezistu na podložku. Následuje odstředování vzorku při nízkých otáčkách, kdy dojde k rovnoměrnému rozlití kapalného rezistu po podložce. Dalším odstředováním vzorku při vysokých otáčkách, typicky 1 000 – 8 000 rpm (*revolutions per minute*, ot/min), dochází k částečnému odparu rozpouštědla z vrstvy rezistu a tvorbě pevné vrstvy rezistu na povrchu podložky (viz Obr. 2.3.18). Tato metoda depozice se nazývá odstředivé lití (*spin-coating*).



Obr. 2.3.18 Princip depozice rezistu metodou odstředivého lití.

Tloušťku vrstvy deponované metodou odstředivého lití lze řídit buďto změnou viskozity připravené tekuté formy rezistu nebo volbou rychlosti při odstředování, případně i množstvím rezistu při disperzi. Změnu viskozity lze docílit například změnou poměru množství pevné látky (solidu) v tekuté látce rozpouštědla (likvidu).



Obr. 2.3.19 Závislost tloušťky rezistu na rychlosti odstředování pro PMMA 950k rozpuštěný v Anisolu pro 9 %_{nm} a 11 %_{nm} koncentraci [53].

Závislost nanášecí rychlosti odstředování pro danou viskozitu rezistu lze stanovit buď experimentálně, nebo výpočtem z empirického vztahu:

$$w = \frac{k_n c^2}{\sqrt{\omega}}, \quad (2.3.8)$$

kde w je výsledná tloušťka vrstvy rezistu [nm], k_n je bezrozměrná konstanta definující viskózní vlastnosti rezistu a také vlastnosti odstředivky, c je hmotnostní koncentrace pevné látky rezistu v rozpouštědle [%] a ω je kruhová rychlost aplikovaná při odstředování [rpm].

Po depozici vždy následuje sušení vrstvy při teplotě 90 až 250 °C (podle typu polymeru) na horké plotně nebo v horkovzdušné peci, aby došlo k odstranění zbytků rozpouštědla z deponované vrstvy a současně tvorbě definované amorfnní struktury v objemu rezistu. Obecně by se dalo konstatovat, že sušení rezistu by mělo probíhat při teplotě vyšší, než je teplota skelného přechodu T_g a současně při teplotě nižší, než je teplota degradace T_c daného typu rezistu [14]. Teplota a délka sušení rezistu jsou u komerčních rezistů vždy součástí popisu v rámci jejich datových listů (*data sheets*).

2.3.4.3 Vyvolávání a vytvrzování rezistů

Jak bylo popsáno v kapitole 2.3.4.1, při expozici rezistu elektronovým svazkem v něm dochází k chemickým změnám (změna molekulární hmotnosti dané organické látky). Při expozici ve vrstvě rezistu vzniká latentní obraz vzoru, jenž je do něj zápisem přenášen [14]. Proces, který následuje po expozici rezistu, je proces vyvolávání. Během vyvolávání dochází k zobrazení latentního obrazu dříve zaznamenaného. Pro případ binární litografie v pozitivním rezistu dojde k rozpuštění míst v rezistu, jež byla exponována; v neexponovaných místech se rezist nerozpouští (resp. rozpouští jen velmi pomalu).

V případě reliéfní litografie (nebo šedé litografie) je zapsaný obraz realizován odlišným úbytkem tloušťky rezistu ve více či méně exponovaných místech.

K selektivnímu rozpouštění rezistu dochází ve vývojce, což je v zásadě rozpouštědlo. Při vyvolávání se využívá faktu, že rychlosti rozpouštění makromolekulárních a nízkomolekulárních látek jsou rozdílné. U nízkomolekulárních látek je umožněno snadnější pronikání rozpouštědla do materiálu a snadnější difuze makromolekul polymeru do rozpouštědla. Vzhledem k tomu, že proces vyvolávání je po fyzikální stránce závislý na difuzi, je celý proces vyvolávání značně závislý na vnějších podmínkách (teplotě) a na způsobu provedení operace vyvolávání (míchání, sprejování, atd.). Z hlediska provedení operace vyvolávání jsou nejběžnější následující způsoby:

- imerze — ponoření podložky s rezistem do lázně s vývojkou;
 - ultrazvuková imerze — probíhá podobně, do lázně jsou aplikovány ultrazvukové vlny zvyšující rychlost difuze polymeru do vývojky;
 - imerze za nízké teploty — s využitím teplotní závislosti procesu difuze (při nízkých teplotách se rychlost rozpouštění snižuje, ale může se zvýšit kontrast rezistu a rozlišení zápisu);
- zalití — nanesení kapky resp. kaluže vývojky na podložku s rezistem;
- sprejování — nanesení vrstvy z kapiček aerosolu vývojky na podložku s rezistem, případně aplikace aerosolu při současném odstředování vzorku.

Po procesu vyvolávání většinou následuje sušení vzorku (*post bake*) nebo vytvrzování (*hard bake*). Při sušení se z rezistu odstraňují zbytky vývojky. Typická teplota sušení je taková, kdy v rezistu ještě nedochází k fyzikálním změnám (tečení), ale kdy již dochází k odparu nebo varu vývojky použité při vyvolávání. Například pro systém PMMA — MBIK : IPA je typický cyklus sušení při teplotě 70 až 90 °C po dobu 30 minut. Proces vytvrzování rezistu typicky probíhá při vyšších teplotách, nicméně většinou pod bodem teploty skelného přechodu T_g daného materiálu rezistu. Obecně pro pozitivní rezisty platí, že tato teplota je nižší než pro negativní rezisty. Typické teploty vytvrzování některých rezistů udává Tab. 2.3.2. Pro sušení resp. vytvrzování rezistu se používá např. horká plotna (*hot plate*) nebo pec (*oven*). Proces vytvrzování rezistů je důležitý z hlediska dalšího zpracování. Vytvrzování typicky zlepšuje mechanickou odolnost rezistu, zvyšuje chemickou odolnost rezistu při suchém i mokřím leptání nebo zlepšuje adhezi vrstvy k podložce.

Tab. 2.3.2 Typické procesní podmínky vytvrzování některých rezistů [50], [51], [52], [53].

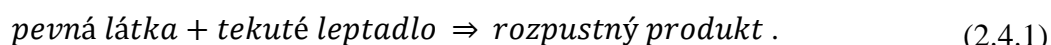
Rezist	Typ	Proces vytvrzování
PMMA MW950k	Pozitivní	120°C @ 30 min oven
AZ1518	Pozitivní	115 @ 30 min oven
CAR-44-05	Negativní	150 - 300 °C @ 10 min hotplate
SU-8 (2005)	Negativní	150°C @ 2-5 min hotplate

2.4 Leptání

2.4.1 Kategorizace leptacích procesů

V mikrovýrobě je leptání využíváno jako metoda přenosu obrazu nebo vzoru předem zaznamenaného do rezistu některou litografickou technikou [3], [4], [5], [6], [7], [8]. Leptání objemového materiálu podložky nebo funkčních vrstev na povrchu podložky je založeno na selektivním opracování povrchů pomocí masky (rezist nebo tvrdá maska). Rezist ve zvolených chrání povrch leptaného materiálu, a tím brání reakcím chemického nebo fyzikálního charakteru, které způsobují erozi materiálu, tj. jeho leptání [1].

Techniky leptání lze rozdělit do dvou tříd, mokré a suché (plasmatické) leptání. Mokré leptání probíhá většinou v chemické lázni podle principu popsaného rovnicí (2.4.1):

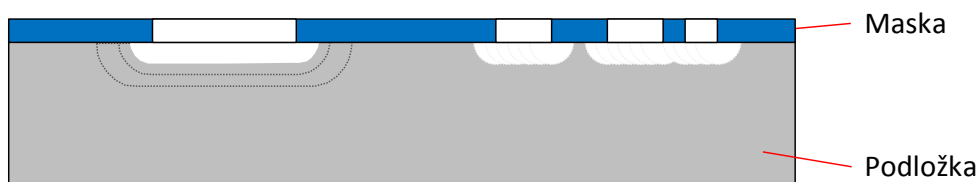


Suché plasmatické leptání probíhá ve vakuové aparatuře s radiofrekvenčním (RF) generátorem a systémem injekce reakčních plynů, podle principu popsaného rovnicí (2.4.2):



Ze způsobu leptání a tvaru leptaných profilů rozlišujeme dvě kategorie leptání, isotropní a anizotropní leptání.

Během isotropního (všesměrového) leptání dochází k tvorbě otvorů podle vlny sférického tvaru, někdy se toto leptání nazývá sférické. Sférický tvar leptaných otvorů je zapříčiněn stejnou rychlostí leptání ve všech směrech. Tento fakt způsobuje podleptávání masky a limituje možnosti použití této metody například při tvorbě velmi jemných struktur. V případě plně isotropního leptání je velikost podleptání masky (v laterálním směru) rovna hloubce leptaných otvorů (ve vertikálním směru).



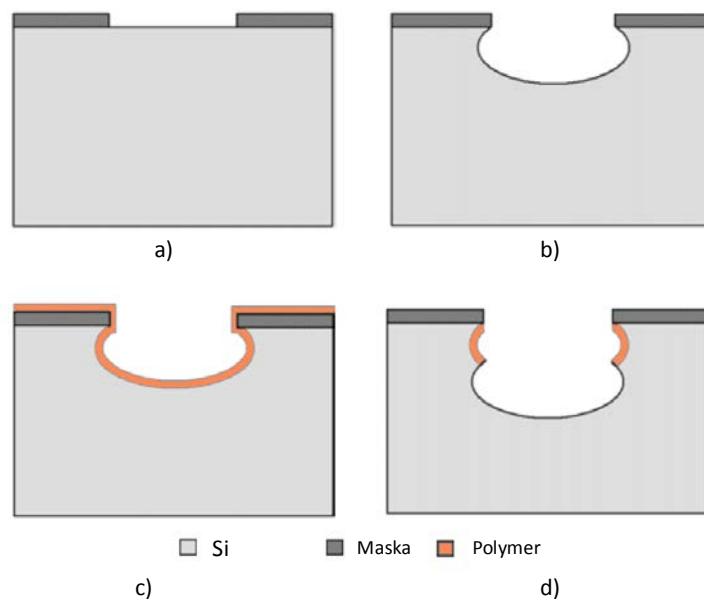
Obr. 2.4.1 Princip isotropního leptání.

Isotropní charakter leptání bývá jedním z nejběžnějších typů leptání. Většina mokrých leptadel má právě isotropní charakter [1], [4]. Podobně můžeme narazit na isotropní charakter leptání i u plasmatického leptání, s výjimkou plasmatického leptání s elektrodou RIE (z anglického *reactive ion etching*).

Anizotropní leptání je charakterizováno jako leptání, u kterého dochází v určitém směru k vyššímu úbytku materiálu než v jiných směrech. V mikrovýrobě bývá nejčastěji využíváno anizotropního leptání, jež má leptací rychlost ve vertikálním směru vyšší, než je rychlost

leptání v laterálním směru. Toho se využívá například při výrobě struktur s velmi jemnými detaily. Anizotropního charakteru leptání lze dosáhnout u plasmatického leptání vhodným nastavením parametrů leptání, jako jsou tlak, výkon a intenzita iontového bombardování.

Další možností je úprava procesu leptání přidáním pasivačního kroku, který se například využívá při leptání křemíku způsobem nazývaným Bosch procesem DRIE (z anglického *deep reactive ion etching*) [23], [24]. V jistých případech lze pozorovat anizotropní charakter leptání i u mokrých leptadel při leptání monokrystalických látek. Tato leptadla většinou využívají principu různé rozpustnosti monokrystalického materiálu v různých krystalografických směrech resp. rovinách.



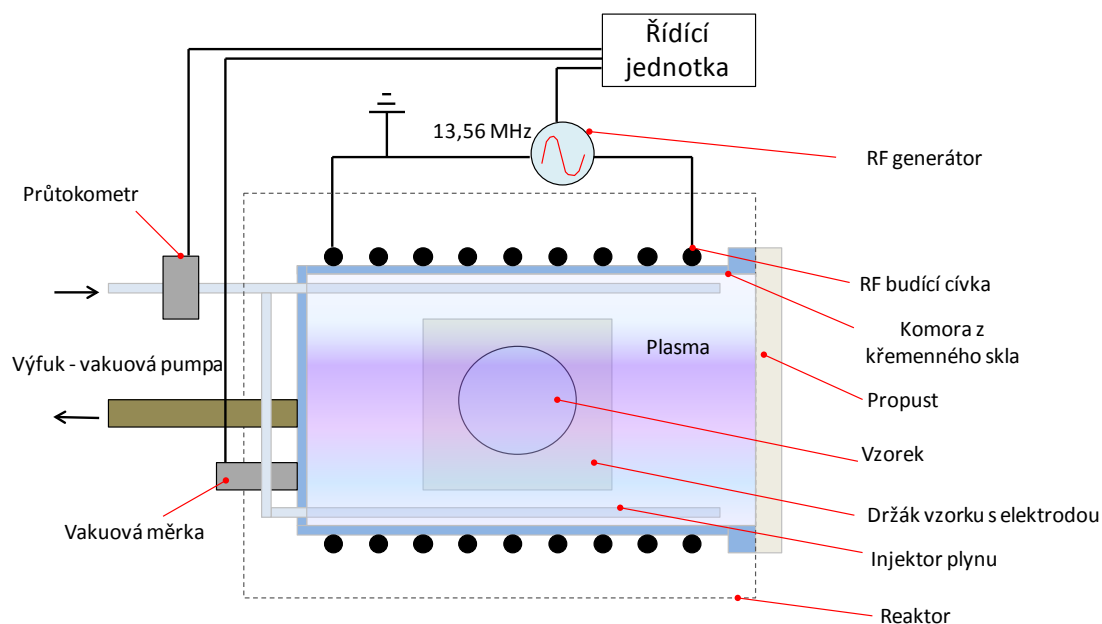
Obr. 2.4.2 Schematický princip anizotropního leptání při Bosch procesu: a) křemíková podložka s litograficky vytvořenou maskou; b) leptací krok; c) polymerizační krok; d) další leptací krok [25].

Z hlediska materiálu pro záznam mikrostruktur technikami leptání je jedním z nejrozšířenějších materiálů využívaných v mikrovýrobě monokrystalický *křemík* (Si) umožňující jak isotropní tak anizotropní leptání, mokrou i suchou cestou.

2.4.2 Plasmatické leptání

2.4.2.1 Plasmatická aparatura

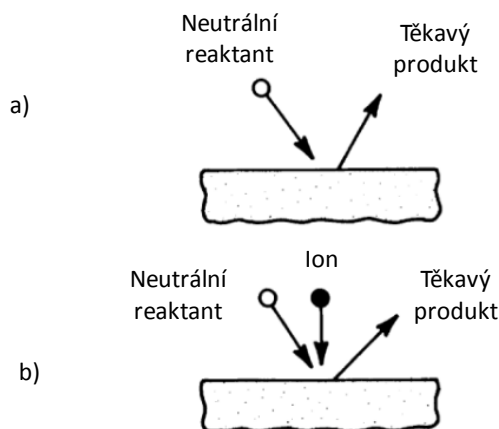
Plasmatické leptání je technologie, která umožnila tvorbu jemných motivů v submikronové oblasti s vysokým poměrem šířky a hloubky, se strmými hranami. V mikrovýrobě IO prakticky nahradila mokré leptání a v oblasti opracování polykrystalického křemíku má výhradní postavení [1].



Obr. 2.4.3 Schéma znázorňující reaktor s induktivně buzenou RF plasmou pro plasmatické leptání.

Plasmatické leptání probíhá v komoře vakuové aparatury, do které je injektován pracovní plyn, který je excitován v RF poli, viz Obr. 2.4.3. V plasmatu dochází k excitaci, ionizaci a dekompozici plynu na reakční složky.

Z principiálního hlediska rozlišujeme dva typy plasmatického leptání: chemické leptání a iontově asistované leptání, viz Obr. 2.4.4. V případě chemického leptání je leptací reakce poháněna přísunem chemicky reaktivních částic, jež v plasmě vznikají, k povrchu leptaného materiálu (chemický proces). V případně iontově asistovaného leptání, nazývaného také jako reaktivní iontové leptání (RIE), navíc dochází i k akceleraci ionizovaných částic směrem k povrchu vzorku (chemický a fyzikální proces).



Obr. 2.4.4 Popis dvou principů plasmatického leptání: a) chemické leptání - neutrální reaktant chemicky reaguje se substrátem a formuje těkavý produkt; b) iontově asistované leptání - neutrální reaktant sám o sobě nemůže vytvořit těkavý produkt, energetické ionty mění podmínky reakce tak, aby vznikl v místě působení těkavý produkt [32].

2.4.2.2 Chemie plasmatu — kyslík

Leptání v plasmatu kyslíku se v mikrovýrobě využívá například pro odstraňování vrstev organických rezistů během procesu spalování (z anglického *ashing*). V jiných případech slouží kyslík jako dodatečný plyn plnicí několik rolí: zvýšení reaktivity primárního leptacího plynu (např. SF₆, CF₄) zvýšením koncentrace reaktantů, reaguje s rezistem, čistí leptaný povrch, případně pomáhá s odstraňováním reziduí a zplodin z primární leptací reakce.

Uvnitř kyslíkové plasmy dochází k řadě reakcí a interakcí [31], [32], [33]. Popsáno je na 196 možných reakcí v kyslíkové plasmě, ke kterým může docházet s různou pravděpodobností [30]. Pro pochopnutí procesu však není nutné uvažovat všechny z nich. Mezi hlavní reakce, které nás z pohledu leptání zajímají, jsou interakce elektronů s molekulami a atomy kyslíku, při kterých vznikají ionizované produkty (2.4.3). Dalšími reakcemi jsou tvorba volných atomů kyslíku, tzv. radikálů (2.4.4), excitace a deexcitace atomů a molekul kyslíku spojená s tvorbou světleného a tepelného záření (2.4.5) a rekombinační reakce mezi kyslíkovými atomy (2.4.6).

Ionizace a tvorba elektronů:



Formování radikálů:



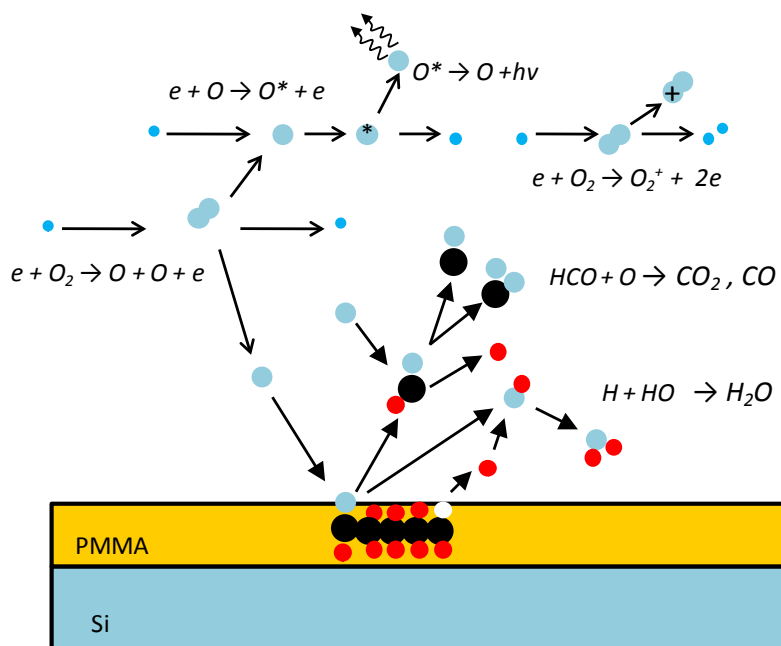
Generace světla a tepla:



Rekombinace:



Pro účely leptání organických vrstev jsou nejdůležitější výsledky reakcí (2.4.4), při kterých dochází k formování volných atomů kyslíku a trojmocné molekuly kyslíku, tzv. radikálů, které jsou silně chemicky reaktivní. Tyto radikály mohou reagovat s atomy a molekulami pevné látky, v našem případě s organickými molekulami rezistu. Výsledkem této chemické reakce je tvorba plynného *kysličníku uhličitého* a *kysličníku uhelnatého* (CO₂, CO), vodních par (H₂O) a současný úbytek hmoty organické látky [31]. V zásadě jde o proces kontrolované oxidace materiálu (hoření) rezistu. Princip hoření organického materiálu je popsán na Obr. 2.4.5.



Obr. 2.4.5 Schematické znázornění některých reakcí probíhajících během leptání v kyslíkové plasmě.

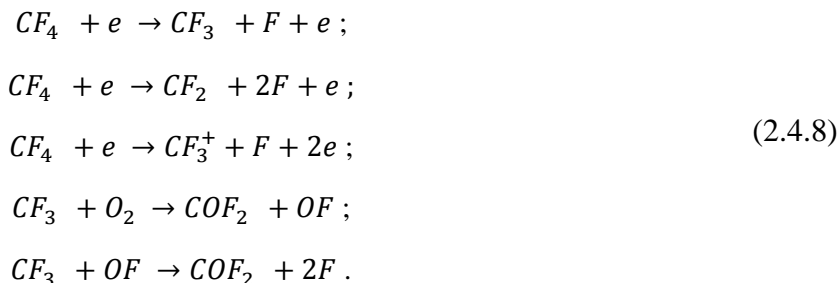
2.4.2.3 Chemie plasmatu — tetrafluormethan

Uvnitř plasmatu na bázi *tetrafluormethanu* (CF_4) případně CF_4/O_2 dochází k řadě reakcí a interakcí mezi částicemi plynu, elektrony a ionty [32], [34], jejichž produkty mohou dále reagovat s atomy pevné látky. Jednotlivé reakce, ke kterým v plasmatu dochází, mají určitou pravděpodobnost a zaleží na řadě parametrů, jako excitační energii, tlaku a teplotě. Některé typy těchto reakcí pro směs CF_4/O_2 jsou popsány následujícími vztahy:

Ionizace a tvorba elektronů:

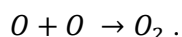


Formování radikálů:



Rekombinace částic plynu:



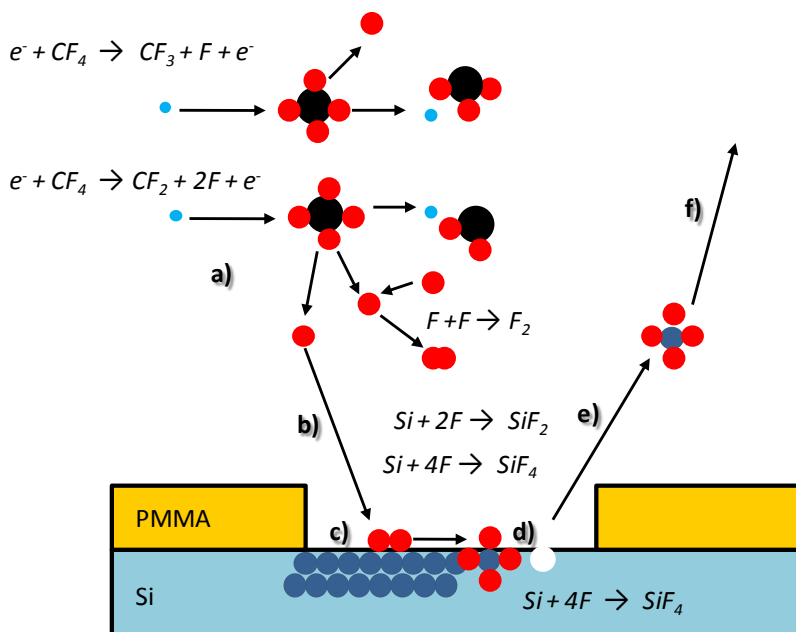
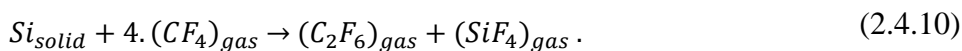


Jde například o vytváření ionizovaných molekul plynu při současné generaci volných elektronů (2.4.7), které pomáhají udržovat aktivitu plasmatu při reakci. Dále tvorba chemicky silně reaktivních radikálů (2.4.8), excitace atomů a molekul, a reakce mezi atomy plynu (2.4.9).

Proces leptání při interakci chemicky aktivních radikálů s atomy pevné látky lze popsat několika kroky:

- generace radikálů srážkami plynu s elektrony;
- difuze radikálů k povrchu leptaného materiálu;
- adsorpce radikálu na povrchu leptaného materiálu;
- chemická reakce mezi atomy/molekulami leptaného materiálu a radikály (vytvoření těkavého produktu);
- desorpce produktu z povrchu leptaného materiálu;
- difuze produktu do objemu plasmy.

Při leptání křemíku v plynu na bázi CF_4 jsou nejdůležitější reakce (viz Obr. 2.4.6), při kterých dochází k tvorbě volných chemicky silně reaktivních atomů *fluoru* F (2.4.8). Část z nich adsorbuje k povrchu křemíku, kde reaguje s jeho atomy. Chemickou reakci na povrchu křemíku lze zjednodušeně popsat rovnicí (2.4.10), viz [31]:



Obr. 2.4.6 Princip plasmatického leptání křemíku v CF_4 přes masku z organického polymeru: a) generace F radikálů v plasmatu; b) difuze F radikálů k povrchu; c) adsorpce F radikálů k povrchu křemíku; d) chemická reakce mezi atomy F a atomy Si; e) desorpce těkavého produktu z povrchu křemíku; f) difuze těkavého produktu reakce do plasmy.

Jak je patrné, výsledkem chemické reakce fluoru s atomy křemíku je *tetrafluorsilan* SiF_4 . Tato chemická sloučenina je (díky velmi nízké teplotě bodu varu -86°C , viz [37], [M45]) silně těkavá, a tak téměř okamžitě přechází do plynné fáze, tj. desorbuje z povrchu křemíku. Během desorpce dochází k úbytku hmoty maskou nechráněného povrchu křemíku, tedy k jeho selektivnímu leptání.

V případě charakterizace procesu leptání pro plynnou směs CF_4/O_2 je třeba brát v úvahu také reakce, ke kterým dochází v kyslíkové plasmě, a také interakce obou plynných složek a jejich fragmentů. Část reakcí v kyslíkovém plasmatu je popsána v předchozí kapitole na Obr. 2.4.5. Část reakcí kyslíku se složkami CF_4 , který má pozitivní vliv na formování F radikálů, je popsána v rovnicích (2.4.8).

2.4.3 Leptání při výrobě membrán a MMS

Při výrobě membránových struktur jsou v zásadě možné dva přístupy: membránu tvoří vrstva deponovaná na povrchu křemíku nebo je membrána tvořena přímo materiálem monokrystalického křemíku [1]. V případě realizace membrány s deponovanou vrstvou je pro její přípravu vhodné zvolit takový materiál, který ji bude mírně namáhat v tahu (vnitřní pnutí vrstvy), tak aby membrána byla napnutá. Vnitřní pnutí ve vrstvě však nesmí být příliš vysoké, jinak by mohlo způsobit prasknutí membrány. Naopak v případě negativního vnitřního pnutí může docházet k prohýbu nebo jiné tvarové deformaci membrány.

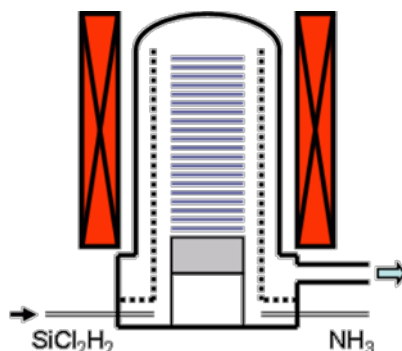
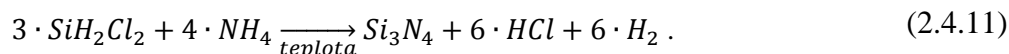
Jelikož se vlastní práce zabývá pouze nitridovými vrstvami pro tvorbu membrán, bude zde rozebrána pouze technika přípravy těchto vrstev. Princip tvorby membrány s vrstvou je založen na mokřím anizotropním leptání podložky z monokrystalického křemíku typicky krystalografické orientace (100). Jako materiál membrány se nejčastěji využívá vrstev deponovaných na povrch křemíkové podložky, u kterých v průběhu leptání křemíku nedochází k jeho úbytku. Samotná tvorba membrány je založena na principu leptání křemíkové podložky přes otvory v leptací masce, vytvořené některou z litografických technik. Při leptání otvorů v křemíku přes masku dochází k ukončení leptání v momentě, kdy se leptací lázeň dostane skrze otvor do kontaktu s neleptatelnou vrstvou na druhé straně desky.

2.4.3.1 Nitrid křemíku — materiál pro tvorbu membrán

Nejběžnější materiál pro tvorbu membrán je *nitrid křemičitý* Si_3N_4 (SIN). Metody depozice tohoto materiálu a jeho kompatibilita s křemíkem je dobře popsána a dlouho známá. SIN se totiž hojně využívá při výrobě IO jako pasivační vrstva nebo jako maskovací materiál při leptání. Z pohledu mokřého anizotropního leptání křemíku v alkalických lázních (KOH, TMAH) se jedná prakticky o neleptatelný materiál, protože jeho selektivita leptání vůči křemíku je lepší než 1 : 2000 [37].

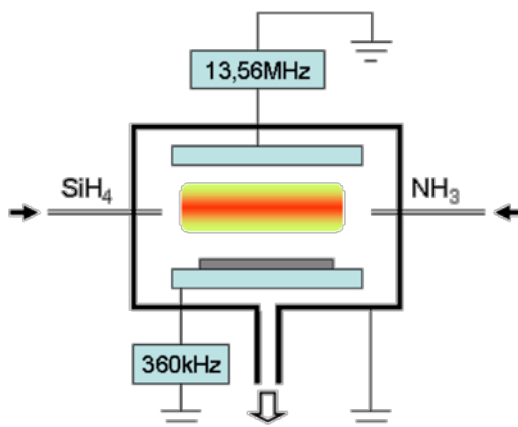
Depozice vrstev nitridu na povrch křemíku je možná dvěma metodami: depozice z chemických par za nízkého tlaku – LPCVD (z anglického *low pressure chemical vapor deposition*) nebo plasmaticky posílená depozice z chemických par – PECVD (z anglického *plasma enhanced chemical vapor deposition*). Pro případ LPCVD dochází k depozici vrstvy

rozkladem *dichlorsilanu* SiCl_2H_2 (DCS) a *amoniaku* (NH_3) při teplotě 700 až 900 °C podle následující chemické reakce:



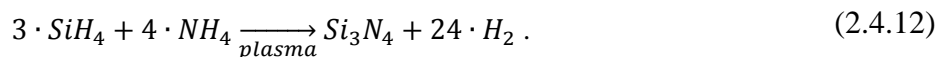
Obr. 2.4.7 Schéma reaktoru pro LPCVD depozici Si_3N_4 [18]

Rozdílné teplotní roztažnosti křemíku a deponované vrstvy nitridu, současně s vysokou teplotou procesu způsobují zpravidla depozici vrstev s vysokým vnitřním pnutím. Úpravou procesu depozice, například změnou teploty, zvýšením toku DCS nebo nastavením vhodného poměru DCS : NH_3 , je možné deponovat i vrstvy s velmi malým, žádným nebo i negativním vnitřním pnutím. Takové vrstvy jsou vhodné pro aplikace MEMS, tj. pro tvorbu membrán.



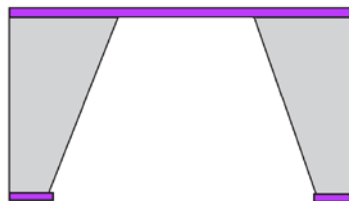
Obr. 2.4.8 Schéma reaktoru pro PECVD depozici Si_3N_4 [18]

V případě PECVD dochází k růstu vrstvy nitridu rozkladem *silanu* SiH_4 (SH) a *amoniaku* NH_3 v plasmatickém výboji. Díky plasmatické excitaci obou složek, během které dochází k rozkladu a reakci jejich složek, není potřeba třeba tak vysoká teplota depozice jako u LPCVD. Metoda tak umožňuje depozici vrstev s nízkým vnitřním pnutím vhodných pro MEMS aplikace. Chemickou reakce při depozici nitridu metodou PECVD lze popsat následujícím vztahem:



2.4.3.2 Mokrý anizotropní leptání křemíku při tvorbě otvoru pro membrány

Anizotropním leptáním křemíku v alkalických lázních lze dosáhnout tvorby různých tvarů leptaných otvorů díky různé rychlosti leptání v různých směrech daných krystalografií leptaného křemíku. Pro anizotropní leptání membrán se prakticky využívá jen monokrystalický krystalografické orientace (100). Pro tento typ materiálu lze totiž v křemíku vytvářet membrány přesně definovaných rozměrů obdélníkového tvaru viz Obr. 2.4.9.



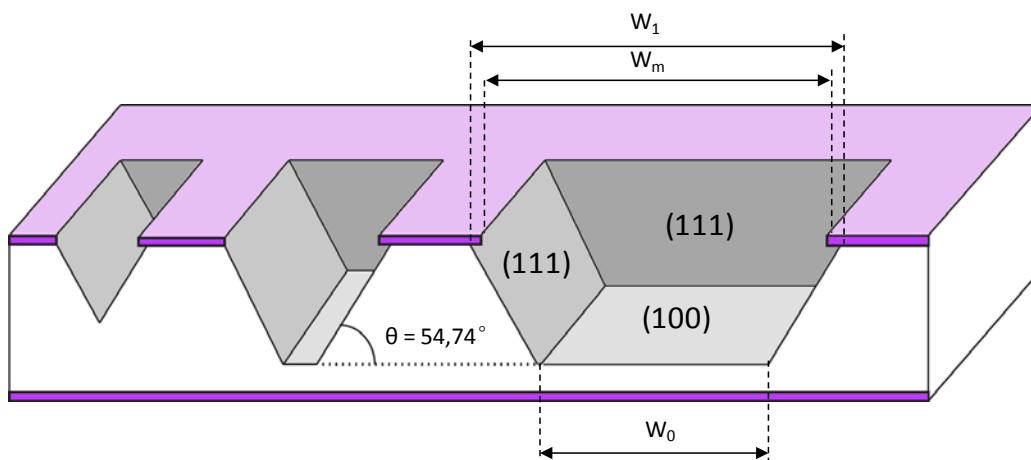
Obr. 2.4.9 Schéma membrány tvořené vrstvou, vzniklou mokrým anizotropním leptáním křemíku (100).

Leptáním křemíku (100) lze prakticky dosáhnout dvou typů tvarů výsledného leptu v závislosti na orientaci a tvaru otvorů v šabloně leptací masky vůči krystalografii podložky. Pro tvorbu membrán se jako šablona leptací masky využívá nejčastěji obdélníkových tvarů, které jsou orientovány souhlasně s fazetou podložky udávající směr rovin {100}. V tomto případě je leptáním dosaženo tvorby otvorů s tvarem čtyřbokého jehlanu nebo komolého čtyřbokého jehlanu, kde stěny tělesa jsou tvořeny rovinami {111} a podstava případně stříška (dno leptu) je tvořena rovinou (100) viz Obr. 2.4.10.

Pro výrobu membrán se volí takový rozměr otvorů v leptací masce, kdy dojde k proleptání celé tloušťky křemíkové desky. Rozměr membrány W_0 lze vypočítat ze vzorce:

$$W_0 = W_m - \frac{2d}{\tan \theta}, \quad (2.4.13)$$

kde d je tloušťka křemíkové desky [μm], W_m je šířka otvorů v masce [μm], W_0 je šířka membrány [μm], a θ je úhel mezi rovinou (100) a rovinami {111} s hodnotou $54,74^\circ$.



Obr. 2.4.10 Prolily otvorů vzniklých mokrým anizotropním leptáním křemíku <100>. Pomalé leptání na šikmých spádových hranách tvořené rovinami (111), rychlé leptání na horizontálních rovinách (100); V případě protnutí rovin (111) dochází k terminaci leptání [1].

Pro tvorbu anizotropních leptů v křemíku se vždy využívají roztoky alkálií. Pro leptání se využívají jak anorganické tak organické roztoky hydroxidů. Mezi nejužívanější patří roztoky *hydroxidu draselného* (KOH) ve vodě o koncentraci 20 % až 40 % a *tetramethylamonium hydroxidu* (TMAH) ve vodě o koncentraci 20 % až 25%. Typické vlastnosti těchto lázní při leptání křemíku (100) jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 2.4.1 Typické vlastnosti nejběžnějších anizotropních leptadel křemíku [1]

Leptadlo	KOH	TMAH
Rychlost (při 80 °C) [μm/min]	1	0,5
Typická koncentrace	40 %	25 %
Selektivita (100) : (111)	200 : 1	30 : 1
Selektivita Si : SiO ₂	200 : 1	2000 : 1
Selektivita Si : Si ₃ N ₄	2000 : 1	2000 : 1

Jak již bylo zmíněno v úvodu, při tvorbě membrán je nutné volit takový maskovací materiál, který vydrží po celou dobu leptání skrz celou tloušťku křemíkové desky. Volbou leptací lázně a tloušťky maskovací vrstvy lze za určitých podmínek využít jako maskovací materiál i jiný materiál než SIN, například SiO₂.

3 Cíle práce

V předchozí kapitole byl představen úvod do problematiky mikrovýroby hlubokých struktur se submikronovým rozlišením, společně s popisem technologií umožňujících jejich přípravu. Z širokého spektra mikrovýrobních technik a technologií byly vybrány dvě hlavní oblasti: elektronová litografie a technologie leptání. Během rozboru těchto technik byl kladen důraz na popis jejich fyzikálního principu potřebný k získání ucelené představy vedoucí k pochopení jejich základních vlastností a charakteristik při tvorbě mikrostruktur.

Technologie výroby mikrostruktur je stále velmi zajímavá, a to jak z pohledu vědecko-výzkumného tak i z hlediska aplikačního — vzhledem k široké oblasti průmyslových aplikací. Například v oblasti mikrooptiky jsou to odlehčené verze klasické objemové optiky s aplikací v osvětlovací technice a automobilovém průmyslu. Aplikace mikrooptiky do těchto oblastí přichází společně s rozvojem zdrojů světla technologie LED (*light emitting diode*).

Druhou aplikační oblastí jsou difrakční prvky využívané ve vědě a výzkumu (VaV). Jejich využití je rozsáhlé, například při zpracování bílého světla, laserového záření, rentgenového záření i elektronových svazků. V mnoha případech je návrh mikrostruktur v těchto oblastech poměrně komplexní, s velmi přesně definovanými požadavky na jejich velikost, tvar a hloubku. V případě aplikací pro zpracování světleného záření jsou požadavky na vlastnosti struktur většinou provázány se specifikací použitého světelného zdroje záření.

Další z aplikačních oblastí difrakčních prvků v průmyslu jsou "hologramy" — difrakční opticky proměnlivá obrazová zařízení (*diffractive optically variable image device*, DOVID). Zařízení DOVID se využívají v tiskařském průmyslu, například při ochraně dokladů, cenin, bankovek, obchodních značek, nebo v obalovém průmyslu pro dekorativní účely. Možnost přípravy těchto prvků s novými vlastnostmi a parametry nebo možností přesnější realizace jejich litografického záznamu umožňuje pokrok vedoucí ke zvýšení jejich bezpečnosti nebo atraktivity.

Pro úspěšné vyřešení problematiky při tvorbě výše zmíněných typů aplikací mikrostruktur je třeba komplexnější přístup. Při výrobě je nutné zhodnotit jak možnosti samotných mikrovýrobních technik tak potenciál jejich provázání.

Vlastní práce se zabývá v první řadě možnostmi úpravy stávajících technologických postupů elektronové litografie, optimalizací návrhových pravidel a strategií zápisu při tvorbě víceúrovňových mikrostruktur. Další část se věnuje modelování rozptylových jevů a jevu blízkosti v elektronové litografii za účelem následné optimalizace zápisových dávek pro komplexní binární nebo víceúrovňové struktury. Zahrnutí výpočtu jevu blízkosti při realizaci struktur se submikronovými detaily a rozlišením jsou v případě výroby těchto struktur zcela zásadní. Pokud je dávkový model, získaný simulací rozptylových jevů, rozšířen o simulaci procesu vyvolávání, kdy se využívá charakteristiky daného systému rezist-vývojka, lze zpřesnit proces vyvolávání. Alternativně lze zpětně upravit parametry expozice tak, aby bylo dosaženo vyššího rozlišení zápisu a kvalitnější realizace obrazu litograficky zaznamenáva-

ného. Studium a charakterizací procesu suchého plasmatického leptání lze upravovat rozměry reliéfních mikrostruktur zaznamenaných v rezistu tak, aby bylo dosaženo jejich optimálního tvaru nebo hloubky. Charakterizací procesu plasmatického leptání křemíku přes rezistovou masku lze umožnit přenos mikroreliéfu do křemíkové podložky, případně zajistit prohloubení reliéfu. Touto metodou lze částečně obejít fyzikální limity elektronové litografie při záznamu hlubokých reliéfních struktur. Poslední část práce je věnována návrhu technologie výroby podložky s nanostrukturovanou membránou. Při této technologii se využívá kombinace technologie elektronové litografie, UV litografie, UV laserové litografie, plasmatického a reaktivního iontového leptání a mokrého anizotropního leptání křemíku. Po návrhu technologického postupu následuje realizace a optimalizace procesu výroby dané nanostruktury.

Hlavní cíle disertační práce lze shrnout do následujících bodů:

- studium možností formování difraktivních optických reliéfních struktur se submikro-novým rozlišením v rezistu;
- optimalizace zápisové strategie při tvorbě víceúrovňových struktur 3D elektronovou litografií;
- charakterizace vlivu jevu blízkosti při zápisu binárních struktur na zařízení BS600;
- korekce jevu blízkosti při zápisu binárních struktur na zařízení BS600;
- charakterizace vlivu jevu blízkosti při zápisu víceúrovňových struktur na zařízení BS600;
- charakterizace procesu leptání rezistů PMMA a SU-8, jejich odolnost při plasmatickém leptání (O_2 plasma, CF_4+O_2 plasma);
- charakterizace leptacího procesu plasmatického leptání křemíků přes masky z organických rezistů v aparatuře s barelovým typem reaktoru;
- sestavení technologických postupů pro prohlubování binárních a víceúrovňových reliéfních struktur;
- studium možností úpravy výšky reliéfu mikrostruktur zaznamenaných v rezistu plasmatickou cestou;
- studium možností výroby MMS — mikro a nanostrukturované membrány.

4 Vlastní práce

Vlastní práci by bylo vhodné na úvod zařadit do kontextu prací týmu elektronové litografie v letech 2009-2016. Rozsáhlou publikační činností v tomto období je možné rozdělit do čtyř částí. První část se týká přímo expozičních zařízení s elektronovým svazkem (elektronové litografie; proudová hustota ve svazku; rozptylové jevy při interakci svazku elektronů s pevnou fází). Druhá část se týká vývoje zpracování rezistů a souvisejících technologických postupů, zejména leptání (leptací techniky; příprava membrán; příprava elektronových emitérů). Ve třetí části jsou různé aplikační oblasti (fotolitografické šablony, metrické standardy a snímáče; reliéfní difrakční struktury, struktury pro interferometrii v bílém světle). Čtvrtá část shrnuje studie týkající se různých technologických zařízení (mikroskop atomárních sil; leptací aparatura). Na badatelskou činnost v těchto oblastech navazuje i aplikačně orientovaný výzkum a vývoj.

Problematika elektronových litografií zahrnuje srovnání zápisových rychlostí expozičních zařízení různých typů [M9], technologie zmenšení tvarovaného svazku [M21], [M28], studie vlivu kompenzace magnetických rušivých polí [M23], srovnání rozlišení dosažitelného litografem s gaussovským svazkem a litografem s tvarovaným svazkem [M30], kombinovaná litografie při využití zařízení s odlišným typem svazku [M34]. Tato problematika byla rovněž náplní řady grantových i interních výzkumných zpráv. Vybrané části jsou zpracovány v kapitole 4.1.

Problematika proudové hustoty ve svazku a homogenity rozložení proudu v tvarovaném svazku, modifikace metoda měření proudu přes ostří nože [M1], metody měření distribuce proudové hustoty v tvarovaném svazku [M2], [M10], studie vlivu nehomogenního osvětlení svazku na vizuálně pozorovanou segmentaci velkoplošných difrakčních struktur [M50].

Vybranou částí technologie elektronové litografie je studium rozptylových jevů při interakci svazku elektronů s vrstvou rezistu případně podložkou, simulace těchto jevů a případně ošetření expozičních dávek, tedy korekce zmíněných jevů. Simulace rozptylových jevů pro tvarovaný svazek elektronů [M25], Monte Carlo simulace [M43], simulace a korekce rozptylových jevů pro tvarovaný svazek při přípravě reliéfních struktur, binárních i víceúrovňových [M46], [M48], [M54]. Tato oblast je zpracována v kapitole 4.2.

Významnou částí je oblast elektronových rezistů a leptacích technik, v této oblasti byly zkoumány možnosti využití negativního UV fotorezistu SU-8 v elektronové litografii [M5], rozvinuty techniky *lift-off* [M19], optimalizovány postupy pro plasmochemické leptání křemíku [M45] a vyvinuty způsoby přípravy hlubokých difrakčních struktur pomocí reaktivního iontového leptání [M52]. Šířka těchto postupů je zpracována do kapitoly 4.3.

Vybranou částí z oblasti litografie i leptání je příprava nanostruktur na nitridových membránách, aplikace v oblasti elektronových svazků [M49], [M51]. Tato část je zpracována v kapitole 4.4.

S problematikou leptání souvisí oblast přípravy emitérů elektronového svazku, byla například vyvinuta metodika modifikace hrotu wolframového elektronového emitéru (katody)

W100/ZrO pomocí reaktivního iontového leptání [M11], [M12], nebo provedena studie týkající se fazet a plošek takových emitorů [M36].

Široké využití elektronové litografie při vývoji různých mikrostruktur ukazuje další část publikací, strukturování tenkých kovových vrstev [M3], kalibrační standardy pro mikroskopii [M20], vývoj senzorů [M22], [M31], fotolitografické masky [M29], [M33], studie přípravy mikrostruktur z hlediska možností galvanické rekombinace. Pro oblast interferometrie v bílém světle byly vyvinuty a připraveny přesné mikrostruktury vhodných parametrů [M7], [M8].

Široká je též oblast přípravy různých difrakčních struktur, příprava víceúrovňových fázových difrakčních struktur [M4], srovnání technik pro analýzu topologie difrakčních mřížek, počítačem generované hologramy [M24], strukturální barvy kovových povrchů [M27], využití difrakčních mřížek jako srovnávacích a testovacích obrazců [M41], plasmonické struktury připravené v rezistu PMMA [M44], nehomogenita intenzity velkoplošných difrakčních struktur [M50].

V další oblasti jsou shrnuty studie týkající se různých technologických zařízení v souvislosti s technologií elektronové litografie, konkrétně metodika měření tvrdých povrchů [M37], litografie při využití zařízení se skenovací sondou (AFM) [M42], [M47], studie možností leptací aparatury [M45].

Úspěšný přesah badatelské činnosti do aplikační oblasti lze doložit na řadě zpráv projektů smluvního výzkumu, kde mezi nejvýznamnější oblasti patří metrické standardy pro mikroskopii [M26], [M38], [M39], [M40], 101, a planární reliéfní struktury na principu difraktivní optiky [M13], [M14], [M15], [M16], [M35], [M53]. Mezi další projekty menšího rozsahu patří například technologie elektronové litografie [M17] nebo realizace kombinované amplitudově fázové masky [M18].

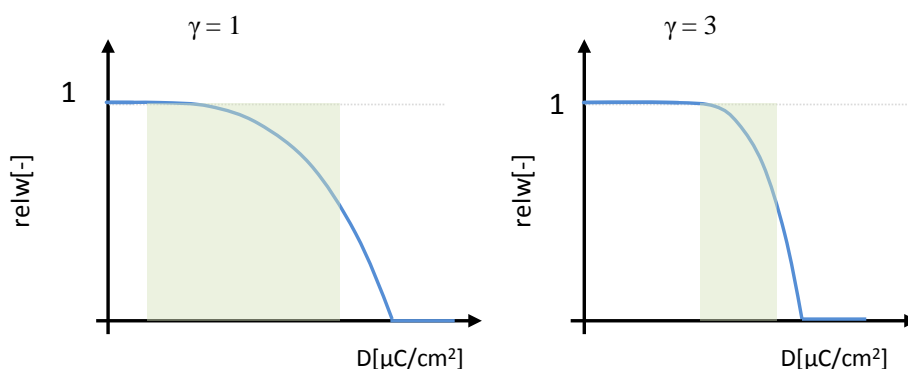
Do další samostatné kalorie spadá vývoj a konstrukce prototypu mikro-stereolitografického (μ SL) zařízení pracujícího na principu dvou-fotonové polymerizace (*two-photon absorption*, 2PA a *two-photon polymerisation*, 2PP). V návaznosti proběhl vývoj technologie a zápisových materiálů. Samotný prototyp vzniklého zařízení je úspěšně využíván komerčním subjektem při vývoji a výrobě mikro-optických prvků.

4.1 EBL - optimalizace postupu datové přípravy pro BS600

Tato kapitola je věnována vývoji v oblasti elektronové litografie (EBL). První část se věnuje optimalizaci tvorby expozičních dat víceúrovňových struktur pro elektronový litograf BS600 v programovém prostředí Expo.NET.

4.1.1 Vývoj Algoritmů pro datovou přípravu mřížek s pilovým profilem

Tvorba víceúrovňových struktur pomocí EBL je založena na principu zápisu obrazu s gradientem expozičních dávek. Expoziční dávka je vyjádřena jako funkce expozičního času a proudové hustoty. Dávkový gradient lze tedy řešit buď změnou proudu ve svazku, nebo změnou délky působení elektronového svazku, tzv. expozičního času. Vzhledem k tomu, že rychlá změna proudu ve svazku v systémech EBL je technicky komplikovaná. Proto se pro dávkové rozmítání využívá změny expozičního času.



Obr. 4.1.1 Křivky citlivosti rezistu.

Při datové přípravě víceúrovňové reliéfní struktury se oproti binárním strukturám využívá širší oblast z křivky citlivosti daného rezistu, rovněž je výhodné použít rezist s nižší hodnotou kontrastu, viz křivky citlivosti na Obr. 4.1.1. S křivkou citlivosti pracujeme při přípravě expozičních dat takovým způsobem, že z ní odečítáme expoziční dávky pro jednotlivé stupně (hloubky) víceúrovňové struktury. Z expozičních dávek lze následně odvodit pro každý bod zapisované struktury a pro daný proud ve svazku potřebný expoziční čas podle rovnice **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.:**

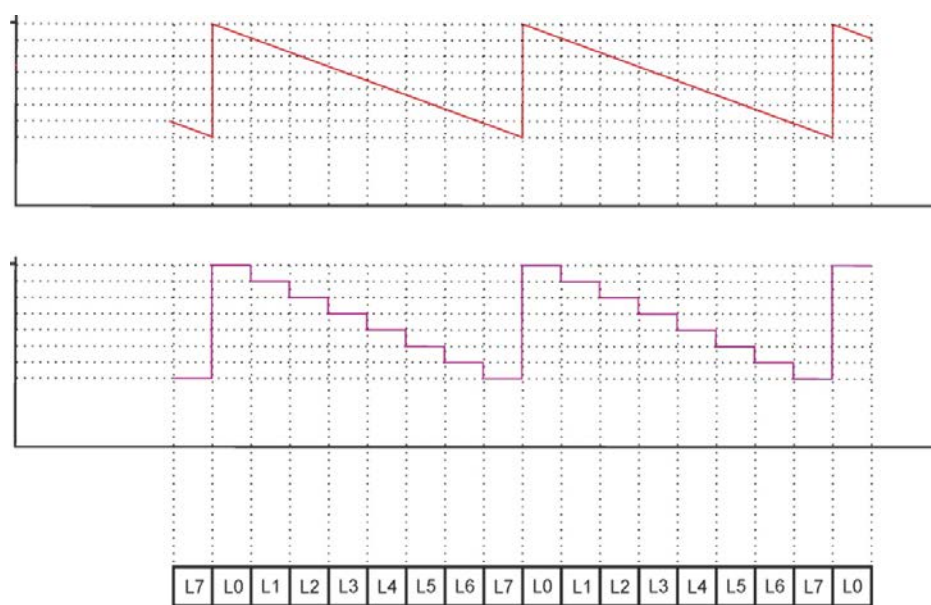
$$\tau = \frac{I_{sv}}{D}, \quad (4.1.1)$$

kde I_{sv} je hodnota proudu ve svazku v $[A.cm^{-2}]$, Q je dávka ozáření v $[\mu C.cm^{-2}]$, a τ je výsledný expoziční čas potřebný pro ozáření $[\mu s]$.

4.1.2 Mřížky s pilovým profilem: základní způsob datové přípravy

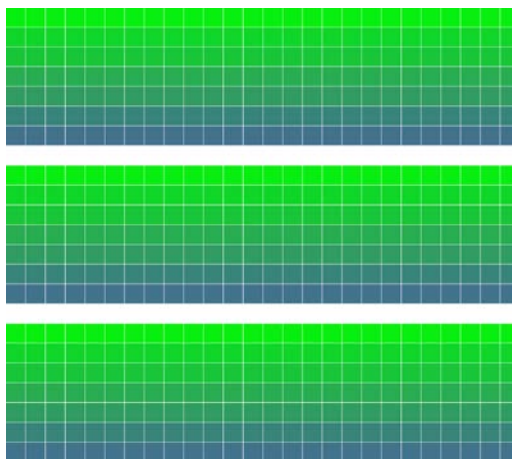
Datovým vstupem je parametrické zadání profilu mřížky a následně model ideálního tvaru mřížky. Vzhledem k tomu, že litograf BS600 skládá zapisovaný obraz z exponovaných ploch (razítek) obdélníkového tvaru je třeba ideální profil mřížky aproximovat na schodkovitý typ

profilu, viz Obr. 4.1.2 Šířka jednoho schodku odpovídá rozměru zápisového svazku (razítka). Úroveň aproximace, tedy množství úrovní/schodků, je volitelná; limitujícím parametrem je pouze rozměr nejmenšího možného expozičního svazku (pro BS600 ≈ 200 nm). Pro difrakční mřížky s pilovitým profilem je v závislosti na periodě mřížek většinou dostačující aproximace na 4úrovňový až 32úrovňový schodkovitý profil. Tomu odpovídají rozměry expozičních svazků $< 0,2 ; 3 > \mu\text{m}$.



Obr. 4.1.2 Příklad tvorby datového vstupu pro litograf EBL BS600 pro mřížky s pilovým profilem.
 Nahoře: ideální tvar z parametrického zadání mřížky; dole: aproximace na 8 úrovňový schodkovitý profil
 reprezentovaný stupni L0-L7 o šířce $a = \Lambda / 8$.

Příklad topologie mřížky s pilovým profilem aproximovaným 8 úrovňovým schodkovitým profilem je na Obr. 4.1.3. Zápis jedné periody mřížky na zařízení BS600 probíhá následujícím způsobem: nejprve je zapsán řádek na sebe navazujících expozic, jenž má programově nastavenou stejnou expoziční dávku D_1 [%], následuje zápis druhého řádku s expoziční dávkou D_2 [%] o stupeň vyšší, postupně až do zápisu posledního řádku n -tého stupně dávkou D_n [%]. Výhodou tohoto způsobu zápisu je jeho jednoduchost, možnost přímé konverze datové bitmapy na dávkový soubor pro elektronový litograf BS600 a jednodušší úprava expozičních dávek (pro případ korekce rozptylových jevů nebo pro případnou kompenzaci sklonu křivky citlivosti).



Obr. 4.1.3 Příklad mřížky s pilovým profilem a její převod na 8úrovňový schodkovitý profil

Problematické na tomto způsobu zápisu se ukázaly oblasti přechodů mezi jednotlivými razítky (jednotkovými expozicemi). Na těchto přechodech dochází k nehomogennímu rozložení energie absorbované v rezistu. Důvodů je několik. Prvním z nich je nehomogenní rozložení proudové hustoty v rámci plochy zapisujícího expozičního svazku. Další důvod souvisí s přesností a hardwarovými parametry zápisového zařízení, jako je například šum katody (kolísání proudu ve svazku), nepřesnosti rozměrového nastavení svazku, i nepřesnosti navazování razítek (nepřesnost systému vychylování). Na výsledné struktuře to může mít za důsledek vytvoření nestejnorodého povrchu s relativně vysokou průměrnou drsností Ra , případně vytvoření parazitních mřížek, které snižují difrakční účinnost realizovaných mřížek.

4.1.3 Mřížky s pilovým profilem: algoritmus s vyhlazováním v jednom směru

Vývoj pokročilého způsobu zápisu mřížky s pilovým profilem následoval v návaznosti na problémy, které se objevovaly na strukturách připravených základním způsobem zápisu. Cílem vývoje tohoto algoritmu je zlepšení optických parametrů difrakčních mřížek, a to vyhlazením nerovností a odstraněním parazitních mřížek, které vznikaly při výše popsaném způsobu zápisu.

Metoda zápisu je modifikována tak, že dávkový gradient pro daný stupeň struktury je tvořen součtem všech dávek po několikanásobné expozici v daném místě struktury. Při vytváření dávkového gradientu se postupuje podle následujícího pravidla. Nejdříve je zapsána obdélníková plocha, jejíž šířka se rovná periodě mřížky snižené o šířku jednoho stupně víceúrovňové struktury $a_n = A - a_0$. Následně je zaznamenána obdélníková plocha, jejíž šířka je rovna periodě mřížky snižené o dvojnásobek šířky jednoho stupně $a_{n-1} = A - 2a_0$. Současně dochází k posunu této plochy vůči předchozí ploše ve směru osy kolmé na orientaci mřížky, a to o polovinu šířky jedné úrovně dx_n . Postup skládání exponovaných ploch lze popsat pomocí vztahů **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** a **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.:**

$$a_n = \Lambda \left(1 - \frac{n}{N}\right), \quad (4.1.2)$$

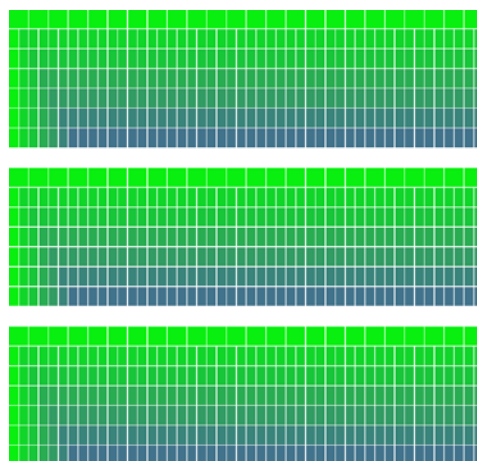
$$dx_n = (n - 1) \left(\frac{\Lambda}{2N}\right), \quad (4.1.3)$$

kde je N celkový počet stupňů víceúrovňové struktury (stupeň aproximace ideálního profilu na schodkovitý profil), Λ je perioda mřížky, n je pořadové číslo stupně, pro který je počítána šířka exponované plochy, a_n je šířka exponované plochy n -tého stupně a dx_n velikost posunu (offsetu) pro n -tou plochu.

Každá jednotlivá plocha je exponována jen fragmentem maximální dávky. Expoziční dávku pro jednotlivé plochy n -tého stupně lze vyjádřit pomocí vzorce (4.1.4):

$$D_n = \frac{D_{max}}{N}, \quad (4.1.4)$$

kde D_{max} je maximální expoziční dávka v gradientu a D_n je expoziční dávka pro plochu n -tého stupně.



Obr. 4.1.4 Způsob zápisu algoritmem s vyhlazováním v jednom směru pro 8úrovňovou mřížku s pilovým profilem

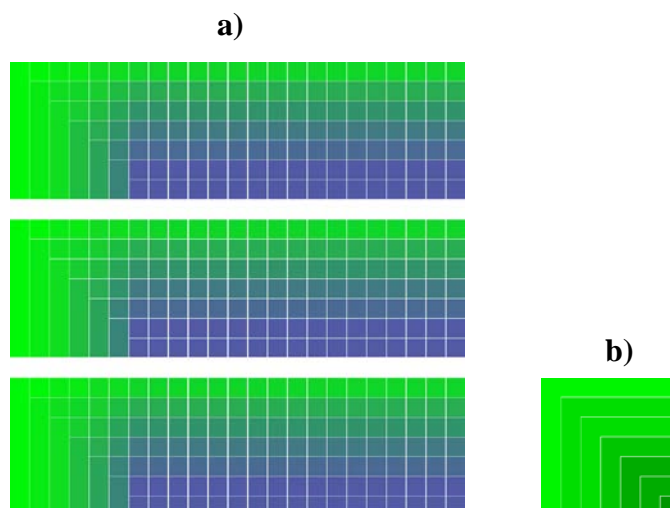
Účelem skládání a překrytu jednotlivých expozičních ploch je zjemnění přechodů mezi jednotkovými expozicemi (razítky), snížení vlivu nepřesnosti nastavení velikosti expozičního svazku a snížení vlivu nepřesného vychylování.

Ačkoliv experimentální způsob zápisu dat výše prezentovaným způsobem prokázal, že idea inkrementální kumulace dávky je možná, a umožnil jisté zlepšení při tvorbě struktur, poukázal také na dva další problémy. Prvním z nich je expoziční náročnost zápisu, kdy počet jednotkových expozic několikanásobně vzrostl. Například pro 8 úrovňovou aproximaci mřížky s periodou $10 \mu\text{m}$ je nárůst počtu základních expozic čtyřnásobný vůči základnímu způsobu zápisu. Při jemnější aproximaci (vyšší počet schodků) dochází k ještě významnějšímu nárůstu počtu základních expozic. Druhý problém je ten, že zjemnění přechodů mezi jednotlivými základními expozicemi došlo jen částečně a jen v jednom směru. Ačkoliv při zápisu struktury dochází k rozmělnění nehomogenního proudového rozložení

v expozičním svazku. Výsledek vyhlazení s ohledem na významný nárůst celkového času zápisu nebyl dostatečně přesvědčivý. Tento způsob datové přípravy se stal mezikrokem při tvorbě zápisových algoritmů potvrzujících funkčnost inkrementální kumulace dávky v rezistu při jeho několikanásobné expozici.

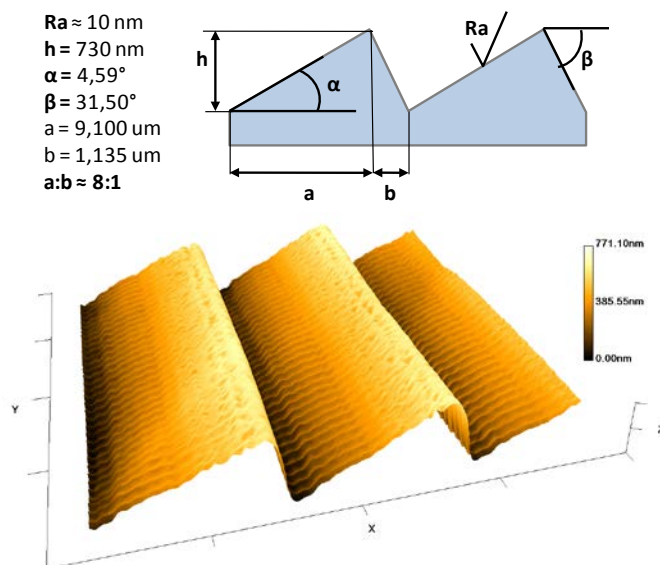
4.1.4 Mřížky s pilovým profilem: algoritmus s vyhlazováním ve dvou směrech

Tento algoritmus datové přípravy klade větší důraz na homogenizaci expoziční dávky a na zjemnění přechodových zón mezi jednotkovými expozicemi (razítky). Tato metoda je opět založena na principu vytváření dávkového gradientu pomocí kumulace expoziční dávky v průběhu vícenásobné expozice. Základním opakujícím se motivem je čtvercová plocha zobrazená na Obr. 4.1.5. Tato čtvercová plocha je tvořena přes sebe exponovanými plochami s postupně se zmenšujícím rozměrem expozičního svazku; rozměr svazku se zmenšuje s krokem $a = 1 / (N - 1)$. Podobně jako u předchozího algoritmu, dochází během zápisu k překryvu plochy složené základního motivu, a to jeho posunem vůči předcházejícímu motivu o krok, jenž je rovný šířce jedné úrovně.



Obr. 4.1.5 Způsob zápisu algoritmem s vyhlazováním ve dvou směrech pro 8úrovňovou mřížku s pilovým profilem a)část motivu mřížky b)opakující se expoziční motiv.

Výsledné reliéfní struktury vykazují velmi dobré optické parametry (viz Obr. 4.1.6) nicméně expoziční náročnost takto připravených struktur je stále velmi vysoká. Náročný je také výpočet dávek pro jednotlivé stupně schodkovitého profilu, a to zejména vzhledem k poměrně složitému součtu přírůstku dávek pro každý ze stupňů. Značně problematická je i možnost automatické generace dávkového souboru ve strojovém jazyce ASBEST převodem ze vstupní datové bitmapy.

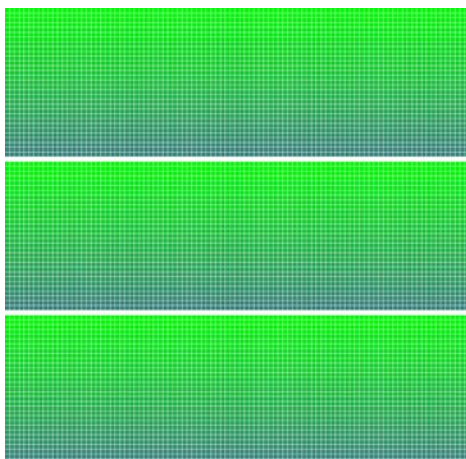


Obr. 4.1.6 Snímek AFM 16 úrovněvé mřížky s periodou $\Lambda = 10 \mu\text{m}$

4.1.5 Mřížky s pilovým profilem: zápis v mezním rozlišení

V tomto případě vychází konstrukce datového souboru i způsob zápisu struktury ze základního způsobu přípravy dat (viz 4.1.3). Při aproximaci ideálního profilu mřížky na schodkovitý tvar je šířka jednoho stupně minimální možná; tato šířka odpovídá nejmenšímu možnému rozměru expozičního svazku, kterým systém EBL BS600 umožňuje zapisovat ($a = SS = 0,2 \mu\text{m}$). Jedná se o zápis v submikronovém rozlišení. Počet schodků aproximovaného profilu mřížky je dán následujícím vztahem (4.1.5):

$$N = \Lambda/a - 1. \quad (4.1.5)$$



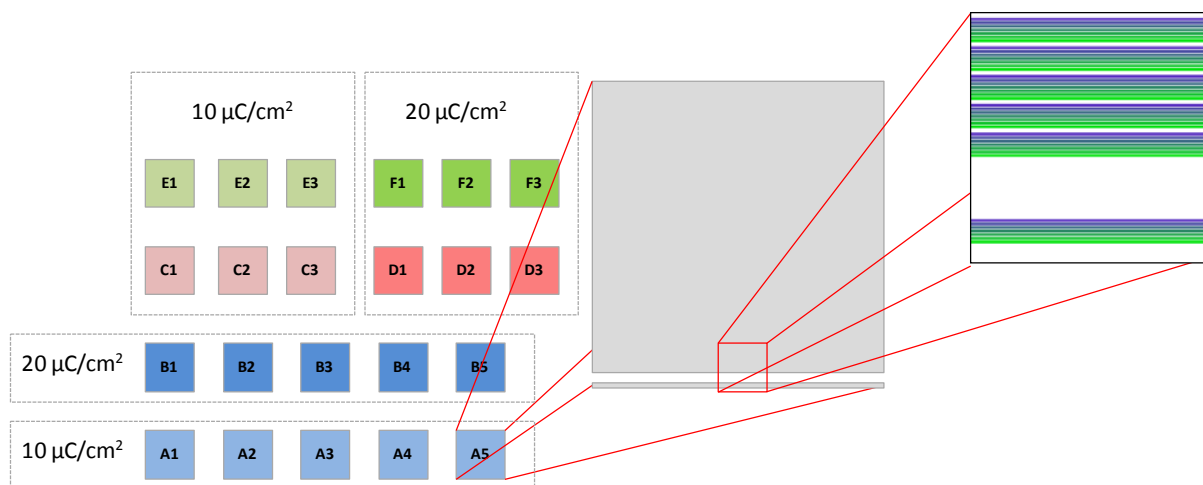
Obr. 4.1.7 Zápis mřížky s pilovým profilem při použití mezního rozlišení.

Tento způsob zápisu byl realizován z důvodů testování zápisového zařízení BS600 na hranici jeho hardwarových možností. Rovněž došlo k ověření způsobu, jakým se bude profilovat mřížka s vysokým stupněm aproximace, tedy s šířkou stupně na úrovni rozlišení

zápisového zařízení. Kromě uvedeného je rovněž významná realizace referenční struktury, která napodobuje způsob zápisu víceúrovňových struktur na zařízeních s gaussovským svazkem. Na referenčních strukturách tohoto typu je možné srovnání časové náročnosti zápisu odlišných zařízení.

4.1.6 Zápis datově optimalizovaných mřížek s mělkým pilovým profilem

Jako vzorek pro srovnání různých algoritmů byla pomocí zařízení BS600 realizována testovací struktura, jež se skládá z matice políček o velikosti $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ vyplněných mřížkou s periodou $10\text{ }\mu\text{m}$, viz Obr. 4.1.8. První část testu, oblasti označené písmeny *A* a *B*, obsahuje mřížky zapsané základním způsobem zápisu popsáním v kapitole 4.1.2. Její součástí jsou varianty pro různé stupně aproximace (8, 16, 32, 25 a 55 úrovní), tomu odpovídá rozlišení zápisu $0,2\text{ }\mu\text{m}$ až $1,25\text{ }\mu\text{m}$, tj. mikronové a submikronové rozlišení zápisu. Druhá část testu, oblasti *C* a *D*, obsahuje mřížky zapsané pomocí prvního vyhlazovacího algoritmu (viz 4.1.3), a to pro tři stupně aproximace (8, 16 a 32 úrovní). Třetí část testu, oblasti *E* a *F*, obsahuje mřížky zapsané pomocí druhého vyhlazovacího algoritmu (viz 4.1.4), zde jsou rovněž tři stupně aproximace (8, 16 a 32 úrovní). Topologii tohoto testu ukazuje schematicky Obr. 4.1.8.



Obr. 4.1.8 Náčrt testu s mřížkami pilovitých průběhů (detaily v textu).

Detailní popis k náčrtu testu s mřížkami pilovitých průběhů (Obr. 4.1.8):

- *A1-A5* mřížky s šířkou stupně $0,2$; $0,3$; $0,4$; $0,6$ a $1,25\text{ }\mu\text{m}$, dávka $10\text{ }\mu\text{C}/\text{cm}^2$;
- *B1-B5* mřížky s šířkou stupně $0,2$; $0,3$; $0,4$; $0,6$ a $1,25\text{ }\mu\text{m}$, dávka $20\text{ }\mu\text{C}/\text{cm}^2$;
- *C1-C3* mřížky vyhlazené prvním algoritmem: 8,16 a 32 úrovní, dávka $10\text{ }\mu\text{C}/\text{cm}^2$;
- *D1-D3* mřížky vyhlazené prvním algoritmem: 8,16 a 32 úrovní, dávka $20\text{ }\mu\text{C}/\text{cm}^2$;
- *E1-E3* mřížky vyhlazené druhým algoritmem: 8,16 a 32 úrovní, dávka $10\text{ }\mu\text{C}/\text{cm}^2$;
- *F1-F3* mřížky vyhlazené druhým algoritmem: 8,16 a 32 úrovní, dávka $20\text{ }\mu\text{C}/\text{cm}^2$.

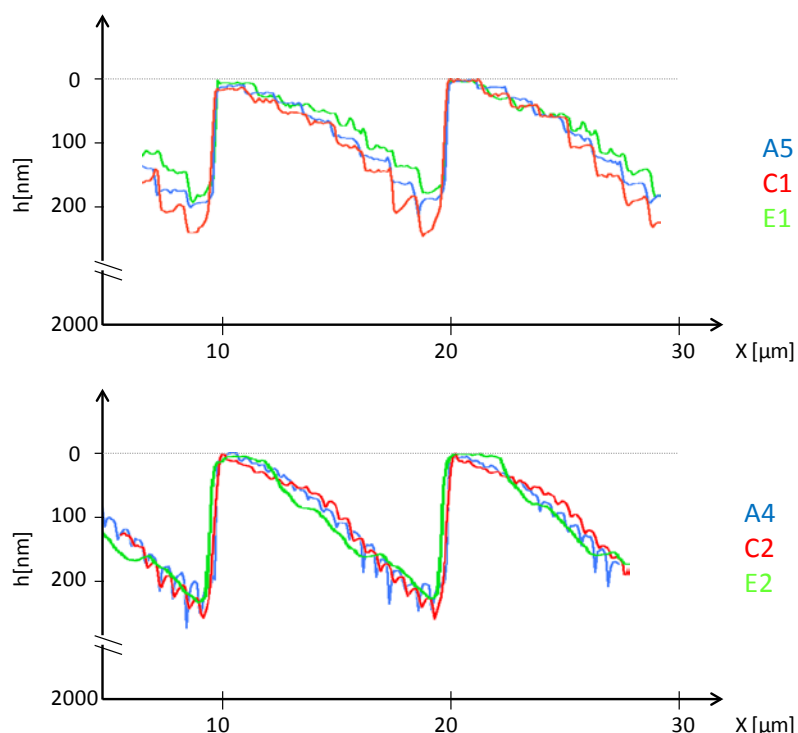
Hodnotící a srovnávací kritéria pro vyhodnocení zaznamenaných struktur byla následující: kvalita povrchu (úroveň nerovnosti reliéfu), difrakční účinnost mřížky, jakost provedení profilu mřížky, výpočetní náročnost zápisu a časová náročnost zápisu.

Jak bylo zmíněno výše, zápis motivu testu byl proveden pomocí elektronovém litografu s tvarovaným svazkem Tesla BS600 (urychlovací napětí 15 kV). Záznamu motivu testu předcházela zápis technologické testovací struktury pro ověření nastavení optické soustavy litografu BS600. Před vlastním zápisem bylo nutné změřit homogenitu proudového rozložení elektronového svazku, měřením proudu ve Faradayově kleci pro výřezy svazku elektronů různých rozměrů.

Záznam obrazových dat s mřížkami byl proveden na podložce s monovrstvou PMMA s molární hmotností $MW \approx 350k$ (tloušťka vrstvy $w \approx 2 \mu m$). Rezistu PMMA o této molární hmotnosti byl zvolen z důvodu možného dosažení takového tvaru a sklonu křivky citlivosti (pro danou vývojku), který by umožňoval nastavení expozičních dávek pro jednotlivé stupně struktury v širším pracovním okně.

Vyvolání testovacího vzorku po expozici proběhlo na odstředivce při aplikaci vývojky n-Amylesteru kyseliny octové (nAAc) s koncentrací 98,5 %. Vyvolávání probíhalo postupně v pěti krocích, s celkovým časem vyvolávání 450 sekund. Mezi jednotlivými kroky vyvolávání probíhala inspekce zapsané mřížkové struktury a technologických testů (plošná citlivost) na optickém mikroskopu. Vyvolávání bylo ukončeno při dosažení hodnoty citlivosti (tedy expoziční dávky pro úplné rozpuštění rezistu) na úrovni expoziční dávky $40 \mu C/cm^2$. Této hodnotě plošné dávky odpovídají hloubky mřížek 200-250 nm (pro maximální dávku mřížky $10 \mu C/cm^2$), respektive hloubky 400-500 nm (pro maximální dávku mřížky $20 \mu C/cm^2$). Byla zvolena taková oblast hloubek mřížek, která je vhodná pro optické vyhodnocení, tedy měření difrakční účinnosti mřížky.

Po vyvolání vzorku následovalo měření struktur mřížek na mikroskopu atomárních sil (AFM) značky *Pacific Nano Technology*. Vyhodnocení změřených profilů a analýza drsnosti byla provedena pomocí SW nástroje *NanoRuler+*. Následující obrázek (Obr. 4.1.9) ukazuje srovnání profilů realizovaných mřížek (osmiúrovňová a šestnáctiúrovňová struktura); a to pro neoptimalizovaný způsob zápisu (modře) a oba optimalizované způsoby zápisu (červeně, resp. zeleně).



Obr. 4.1.9 Srovnání změřených profilů 8úrovňových (nahore) a 16úrovňových (dole) mřížek s pilovým profilem.

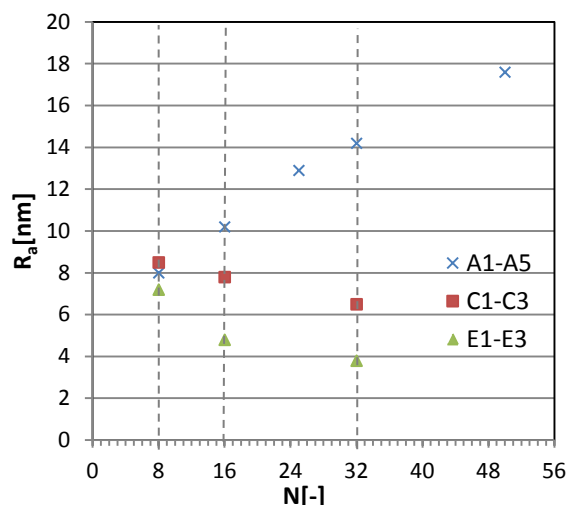
Jak je patrné, při vyšším stupni aproximace dochází k vyhlazování profilu mřížky a k odstranění zřetelných schodků. Zaoblení profilu mřížky je primárně dáno nelineární závislostí křivky citlivosti pro použitou kombinaci rezistu a vývojky. Sekundárně, u stupňů exponovaných vyšší dávkou (ze dna profilu mřížky), je zaoblení způsobeno rovněž vzájemnou interakcí sousedních expozic.

Přechodové zóny jsou patrnější pro mřížky zaznamenané s vyšším stupněm aproximace profilu (Obr. 4.1.9, profil A4). Těchto přechodových zón mezi jednotlivými expozicemi je zde totiž více. U záznamu vyhlazených mřížek C2 a F2 je patrná redukce množství přechodů mezi jednotlivými stupni schodkovitého reliéfu. Značné vylepšení drsnosti povrchu mřížky je patrné ve směru kolmém na profil mřížky, a to u obou typů vyhlazených struktur.

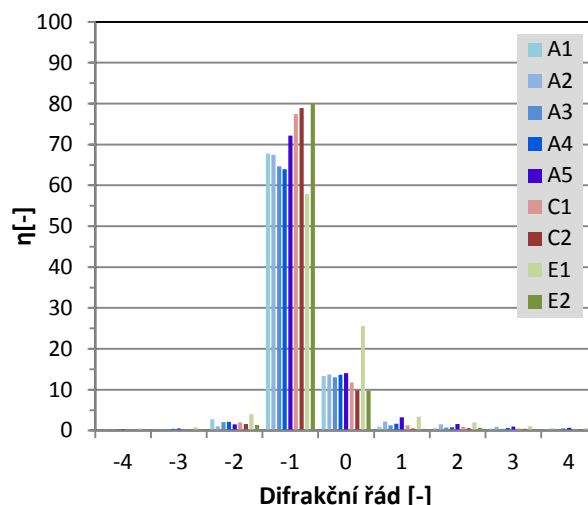


Obr. 4.1.10 Srovnání vyhlazení pro směr kolmý na profil mřížky pro všechny tři typy strategie zápisu.

Vyhlazení je nejvíce patrné ve směru kolmém na profil mřížky a to u obou typů struktur zapsaných s vyhlazovací strategií viz Obr. 4.1.10.



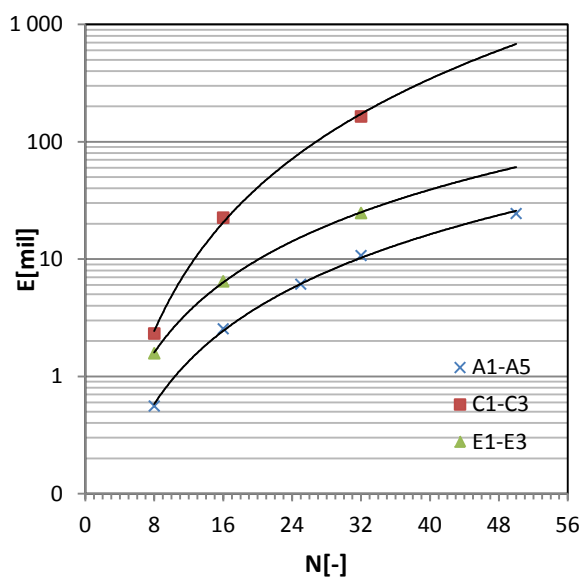
Obr. 4.1.11 Vyhodnocení průměrné drsnosti povrchu (R_a) měřeno na ploše opticky aktivní hrany mřížky.



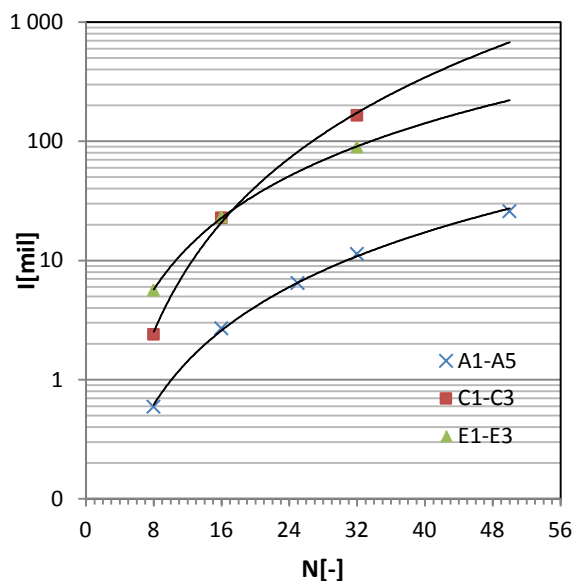
Obr. 4.1.12 Měření optické účinnosti mřížek pro difrakční řády $m = \langle -4, 4 \rangle$, měřeno laserem $\lambda = 650 \text{ nm}$.

Vyhodnocení průměrné drsnosti R_a odečtené z plochy v závislosti na počtu úrovní N zaznamenané mřížky je zobrazeno v grafu, viz Obr. 4.1.11. Ze závislosti vyplývá, že pro případ obou vyhlazovacích strategií zápisu dochází k významnému snížení drsnosti povrchu. Pro vyhlazené struktury (C1–C3 a E1–E3) platí, že se zvyšujícím se počtem úrovní, kterým je reliéf mřížky při zápisu interpretován, dochází k posílení pozitivního efektu snížení drsnosti povrchu. Naopak pro nevyhlazené struktury (A1–A5) dochází se zvyšujícím se počtem úrovní k zvýšení drsnosti, to je způsobeno zvyšujícím se množstvím přechodů mezi jednotkovými expozicemi, kde může docházet k nehomogenní absorpci energie (dávky).

Analýzy výpočtové a zápisové náročnosti byly provedeny na simulátoru ExpoNET na vzorku mřížek použitých v zapsaném testu. V grafech na Obr. 4.1.13 a Obr. 4.1.14 jsou zobrazeny závislosti počtu instrukcí I a jednotkových expozic E na počtu úrovní N zapisované struktury pro všechny tři strategie zápisu. Hodnoty parametrů I a E v grafech jsou dány v milionech.



Obr. 4.1.13 Hodnocení expoziční náročnosti pro jednotlivé mřížky v testu vztažené na plochu 1 mm^2 .



Obr. 4.1.14 Hodnocení výpočtové náročnosti pro jednotlivé mřížky v testu vztažené na plochu 1 mm^2 .

Ze závislostí je patrný stoupající trend expoziční i výpočtové náročnosti s rostoucím počtem úrovní, ze kterých se mřížka skládá. Nejúspornější v tomto směru je základní způsob zápisu (A1–A5). Nejnáročnější je vyhlazovací algoritmus s vyhlazováním v jednom směru (C1–C3). Trend expoziční náročnost sleduje mocninou funkcí s exponentem o hodnotě ≈ 3 . Dle předpokladu se chová vyhlazovací algoritmus s vyhlazováním ve dvou směrech (E1–E3), u kterého je patrné snížení počtu expozičních oproti algoritmu s vyhlazováním v jednom směru. Trend expoziční náročnost v tomto případě sleduje mocninou funkcí s exponentem o hodnotě ≈ 2 . Výpočtová náročnost je pro obě vyhlazovací strategie zápisu poměrně vysoká avšak při dnešních výpočtových výkonech počítačů zůstává v únosných mezích.

Konečná fáze vyhodnocení byla provedena měřením difrakční účinnosti mřížek. Aby bylo možné provést měření byl křemíkový vzorek pokoven v magnetronové naprašovačce vrstvou stříbra (Ag) o tloušťce přibližně 100 nm . Měření bylo provedeno na aparatuře pro měření difrakce skládající se z laserového zdroje ($\lambda = 650 \text{ nm}$), luxmetru s detektorem s kosinovým filtrem a úhlově nastavitelným držákem. Měření probíhalo při přibližně kolmém dopadu laserového paprsku na motiv mřížky postupným odečtem intenzity v -4 až $+4$ difrakčním řádu. Pro účely výpočtu difrakční účinnosti byla vždy změřena také intenzita laseru při odrazu od pokovené křemíkové desky bez motivu. Výsledky měření jsou prezentovány v grafu na Obr. 4.1.12. Z měření je patrná poměrně vysoká účinnost všech zaznamenaných struktur v prvním difrakčním řádu a to $60\text{--}80\%$. Výjimku tvořila struktura E2, která nebyla hloubkově správně naladěna (byla mělká), a tudíž dosahovala nižší účinnosti. Výsledky měření víceméně korespondují s teoretickými předpoklady pro n-stupňové mřížky pilového typu.

Shrnutím výsledků, lze konstatovat, že víceúrovňové mřížky zapsané pomocí BS600 při aplikaci vyhlazovacích strategií zápisu dosahují velice dobrých fyzikálních parametrů. Jistá komplikace vzniká u hlubších reliéfů, při použití lineárního gradientu expozičních dávek. U těchto prvků je patrné zakřivení reliéfu, které je dáno mimo jiné nelineárním průběhem křivky citlivosti. Možné řešení tohoto problému je rozvinuto v následující kapitole.

4.1.7 Zápis datově optimalizovaných víceúrovňových mikrostruktur — kompenzace tvaru křivky citlivosti

Jedním z problémů, ke kterému dochází při výrobě víceúrovňových struktur litografickými technikami, je nesprávná tvorba průběhu profilu. Tato situace může ovlivňovat fyzikální vlastnosti mikrostruktury (v daném případně optické vlastnosti). Jedním z důvodů bývá nelineární průběh křivek citlivosti. V případě záznamu mělkých mikrostruktur do rezistu s nízkým kontrastem tento problém nemusí být tak zřejmý. Ale pro případ mikrostruktur s hloubkou $< 1\ \mu\text{m}$ již může tvar křivky citlivosti hrát významnou roli.

Prvním krokem pro kompenzaci nelineárního průběhu křivek citlivosti je charakterizace plošné citlivosti rezistu pro dané podmínky vyvolávání rezistu. Toho lze docílit zápisem a měřením vhodného testu, který obsahuje dávkový gradient. Vhodnou aproximací změřeného průběhu křivky citlivosti polynomem n -tého stupně lze získat matematickou interpretaci závislosti hloubky na expoziční dávce v každém bodě funkce.

Současně je třeba vytvořit model připravované víceúrovňové struktury Obr. 4.1.2 a stanovit požadavek na hloubku jednotlivých stupňů struktury, resp. hloubkové přírůstky mezi jednotlivými stupni. Aplikací tohoto modelu na matematickou interpretaci křivky citlivosti, lze pro jednotlivé stupně struktury stanovit expoziční dávky, které povedou k přesnější realizaci reliéfu víceúrovňové struktury.

Pro experimentální ověření výše zmíněného postupu byly vypočítány expoziční dávky z křivky citlivosti (PMMA MW 495k, tloušťka vrstvy $w = 1500\ \text{nm}$, vývojka Ac/Etha 1 : 1, doba vyvolání 150 s) pro víceúrovňové struktury (4.; 8. a 16. úrovní) mřížkového typu s hloubkami 200 nm a 500 nm. Hloubkový model jednotlivých struktur ukazuje Tab. 4.1.1. Hodnoty expozičních dávek pro jednotlivé stupně odečtené z křivky citlivosti rezistu jsou shrnuty v Tab. 4.1.2.

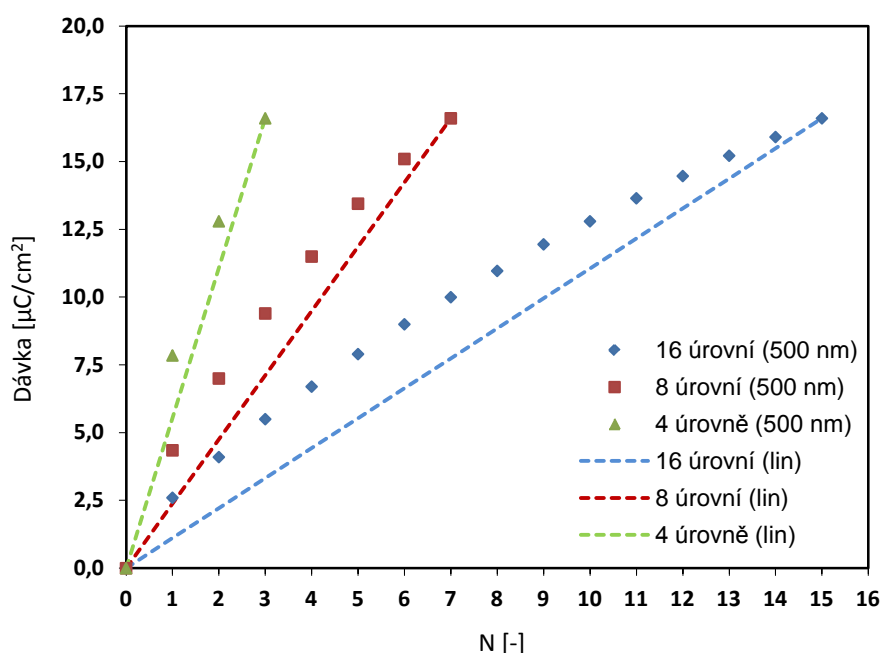
Tab. 4.1.1 Tabulka hloubek pro jednotlivé stupně víceúrovňových struktur s maximální hloubkou h_{\max} 200 nm resp. 500 nm.

Úroveň	Hloubka [nm]					
	4 úrovně		8 úrovní		16 úrovní	
	pro h_{\max}	pro h_{\max}	pro h_{\max}	pro h_{\max}	pro h_{\max}	pro h_{\max}
	200nm	500nm	200nm	500nm	200nm	500nm
0	0	0	0	0	0	0
1	66,67	166,67	28,57	71,43	13,33	33,33
2	133,33	333,33	57,14	142,86	26,67	66,67
3	200,00	500,00	85,71	214,29	40,00	100,00
4	x	x	114,29	285,71	53,33	133,33
5	x	x	142,86	357,14	66,67	166,67
6	x	x	171,43	428,57	80,00	200,00
7	x	x	200,00	500,00	93,33	233,33
8	x	x	x	x	106,67	266,67
9	x	x	x	x	120,00	300,00
10	x	x	x	x	133,33	333,33
11	x	x	x	x	146,67	366,67
12	x	x	x	x	160,00	400,00
13	x	x	x	x	173,33	433,33
14	x	x	x	x	186,67	466,67
15	x	x	x	x	200,00	500,00

Tab. 4.1.2 Tabulka expozičních dávek odečtených z křivky citlivosti pro hloubky definované v Tab. 4.1.1.

Úroveň	Expoziční dávka [$\mu\text{C}/\text{cm}^2$]					
	4 úrovně		8 úrovní		16 úrovní	
	pro h_{\max}	pro h_{\max}	pro h_{\max}	pro h_{\max}	pro h_{\max}	pro h_{\max}
	200nm	500nm	200nm	500nm	200nm	500nm
0	0	0	0	0	0	0
1	4,1	7,9	2,20	4,35	1,10	2,60
2	6,7	12,8	3,75	7,000	2,10	4,10
3	9,0	16,6	4,90	9,400	3,05	5,50
4	x	x	6,025	11,500	3,60	6,700
5	x	x	7,025	13,450	4,15	7,900
6	x	x	8,030	15,100	4,75	9,000
7	x	x	9,000	16,600	5,25	10,000
8	x	x	x	x	5,750	10,970
9	x	x	x	x	6,250	11,950
10	x	x	x	x	6,720	12,800
11	x	x	x	x	7,150	13,650
12	x	x	x	x	7,650	14,470
13	x	x	x	x	8,090	15,220
14	x	x	x	x	8,500	15,910
15	x	x	x	x	9,000	16,600

Srovnání lineárního dávkového gradientu a modifikovaného dávkového gradientu je ukázáno na Obr. 4.1.15. Z modelu je patrné, že kdyby se využilo při zápisu lineárního dávkového gradientu, tak by výsledná struktura byla tvarově deformovaná.



Obr. 4.1.15 Srovnání průběhu lineárního dávkového gradientu a průběhů s modifikací expozičních dávek dle křivky citlivosti pro tři typy víceúrovňových struktur o n stupních.

Zápis struktur byl proveden na EBL BS600 do vrstvy rezistu PMMA MW 495k ($w = 1500$ nm) na křemíkové podložce. Veškeré struktury byly zapsány v submikronovém rozlišení, tj. svazkem o velikosti $0,6 \mu\text{m}$ (8úrovňová a 16úrovňová) a $0,3 \mu\text{m}$ (4úrovňová). Z hlediska datové přípravy byly pro zápis mikrostruktur použity dvě strategie, a to klasický způsob zápisu (viz 4.1.2) a zápis s násobnou expozicí s vyhlazovacím efektem (viz 4.1.3). Vyvolávání vzorku probíhalo na odstředivce ve vývojce V11 (směs acetonu a etylalkoholu v poměru 1 : 1) ve dvou krocích s celkovým časem vyvolávání 180 s.

Tab. 4.1.3 Tabulka vypočtených a naměřených hodnot při vyhodnocování víceúrovňových struktur zapsaných s vyhlazováním v jednom směru.

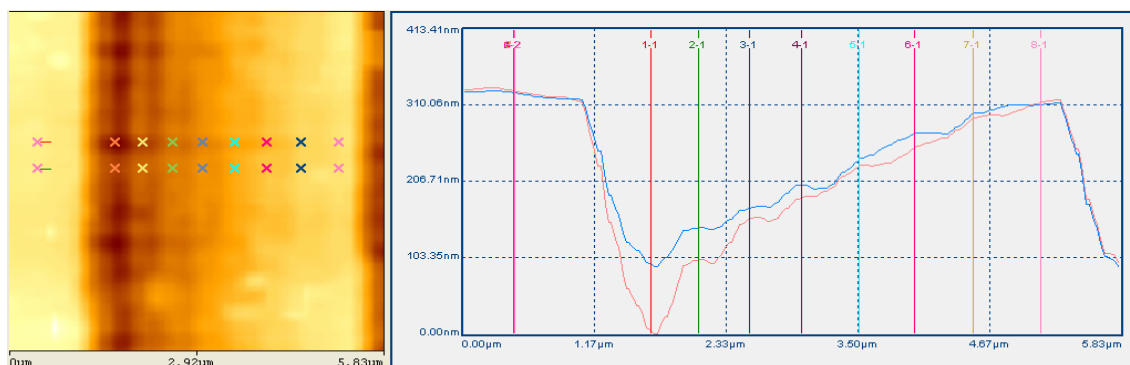
$D_{\max} = 16,6 \mu\text{C}/\text{cm}^2$					
N	Λ	h_{\max}	Ra	α	β
[-]	[μm]	[nm]	[nm]	[°]	[°]
4	1,2	475,0	16,3	28,2	57,3
8	4,8	509,0	15,1	7,6	51,8
16	9,6	550,0	18,5	4,4	31,3
$D_{\max} = 9,0 \mu\text{C}/\text{cm}^2$					
N	Λ	h_{\max}	Ra	α	β
[-]	[μm]	[nm]	[nm]	[°]	[°]
4	1,2	234,0	16,8	15,1	37,4
8	4,8	219,0	20,7	3,5	30,3
16	9,6	199,0	20,2	1,5	22,7

Tab. 4.1.4 Tabulka vypočtených a naměřených hodnot při vyhodnocování víceúrovňových struktur zapsaných bez vyhlazování.

$D_{\max} = 16,6 \mu\text{C}/\text{cm}^2$					
N	Λ	h_{\max}	R_a	α	β
[-]	$[\mu\text{m}]$	$[\text{nm}]$	$[\text{nm}]$	$[\circ]$	$[\circ]$
4	1,2	490,0	25,9	30,9	62,9
8	4,8	474,0	24,9	7,2	53,2
16	9,6	554,0	26,3	4,2	50,4
$D_{\max} = 9,0 \mu\text{C}/\text{cm}^2$					
N	Λ	h_{\max}	R_a	α	β
[-]	$[\mu\text{m}]$	$[\text{nm}]$	$[\text{nm}]$	$[\circ]$	$[\circ]$
4	1,2	208,0	13,8	14,4	50,3
8	4,8	207,0	11,0	3,9	25,5
16	9,6	255,0	14,2	1,5	24,8

Měření a vyhodnocování vzorků proběhlo na AFM značky Pacific Nanotechnology (viz Tab. 4.1.3 a Tab. 4.1.4). V rámci měření se vyhodnocovala správnost tvarové realizace 3D profilu; (α $[\circ]$ – úhel aktivní hrany, β $[\circ]$ – úhel parazitní hrany, Λ $[\mu\text{m}]$ – perioda), maximální hloubka h_{\max} $[\text{nm}]$ a průměrná drsnost R_a $[\text{nm}]$. Z hodnot těchto parametrů bylo provedeno srovnání obou strategií zápisu. Výsledky analýzy ukazují, že metodika nastavení expoziční dávky z křivky citlivosti pro jednotlivé stupně víceúrovňových struktur je funkční. Pro obě strategie zápisu se podařilo poměrně přesně nastavit maximální hloubku reliéfu ($h_{\max} = 200$ a 500 nm). Z analýzy průběhu profilu je patrný účinek linearizace. Jistá nepřesnost realizace profilu je patrná u klasické strategie zápisu. Tuto nepřesnost je možné vysvětlit delší dobou vyvolávání, než bylo nutné (posun křivky citlivosti), případně změnou rozměru velikosti expozičního svazku v průběhu zápisu struktur. Další faktor, který může hrát významnou roli, je samotná přesnost matematického modelu křivky citlivosti. Data pro stavbu křivky citlivosti se získávají měřením (nejčastěji kontaktní profilometrií), při kterém může docházet k chybě odečtu hloubky. Chyba odečtu může být vyšší pro malé hloubky (tomu odpovídají malé expoziční dávky). Ukazuje se totiž, že na zaznamenaných víceúrovňových mřížkách se objevily odchylky v oblastech nízkých expozičních dávek.

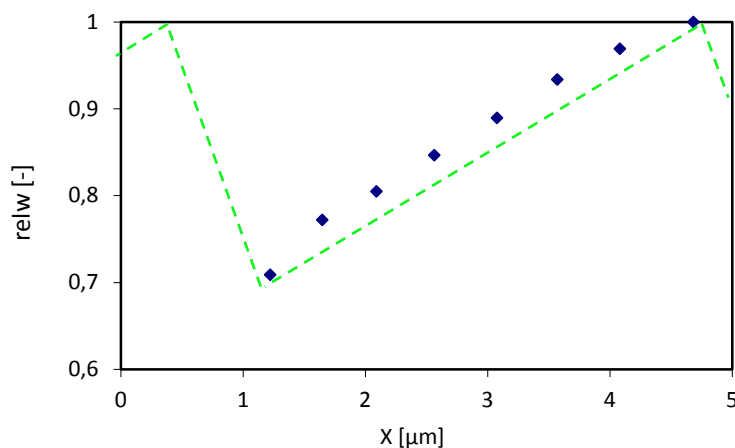
Zvýšení přesnosti odečtu křivky citlivosti lze dosáhnout záznamem a měřením testu citlivosti mřížkového typu (speciálně pro tento účel zkonstruovaném) na přesnějším zařízení např. na AFM. Další možností je vyhodnocení profilů požadovaných víceúrovňových struktur a modifikace dávek dle těchto profilů pro další expozici. Dle potřeby lze tento postup iterovat, dokud není dosaženo požadovaného nebo nejlepšího možného výsledku. Tento iterativní postup je nastíněn na Obr. 4.1.16, Obr. 4.1.17 a Tab. 4.1.5.



Obr. 4.1.16 Měření víceúrovňového prvku na AFM pro iterativní postup ladění hloubky.

Tab. 4.1.5 Tabulka expozičních dávek pro záznam víceúrovňového reliéfu; dávky původní a modifikované (linearizované)

Původní expoziční dávka	Modifikovaná dávka	Nárůst
[$\mu\text{C}/\text{cm}^2$]	[$\mu\text{C}/\text{cm}^2$]	[%]
0,00	0,00	0
2,45	2,51	2,3
4,90	5,13	4,6
7,35	7,64	4,0
9,80	10,16	3,7
12,25	12,73	3,9
14,70	15,74	7,1
17,15	17,15	0

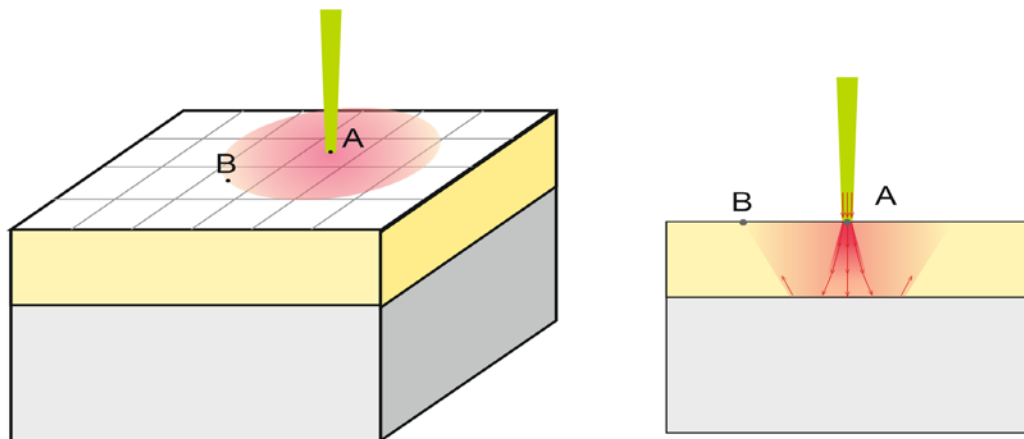


Obr. 4.1.17 Grafická interpretace reliéfu víceúrovňového prvku požadovaného (čárkovaná čára) a změřeného.

Hlavním limitujícím faktorem výše nastíněné metody optimalizace expozičních dávek je nehomogenita rozložení absorbované energie v ploše a hloubce v důsledku rozptylových jevů, ke kterým dochází během zápisu elektronovým svazkem. Pro hrubší struktury lze tuto metodu použít samotnou bez nutnosti ošetření rozptylových jevů. Od jisté hranice jemnosti struktur je nutné rozptylové jevy zohlednit. Pro litograf BS600 (s urychlovacím napětím 15 keV) je tato hranice přibližně 1 μm . Následující kapitola se zabývá řešením simulace a modifikace expozičních dávek při realizaci mikrostruktur při zohlednění rozptylových jevů.

4.2 Simulace a korekce jevu blízkosti u EBL BS600

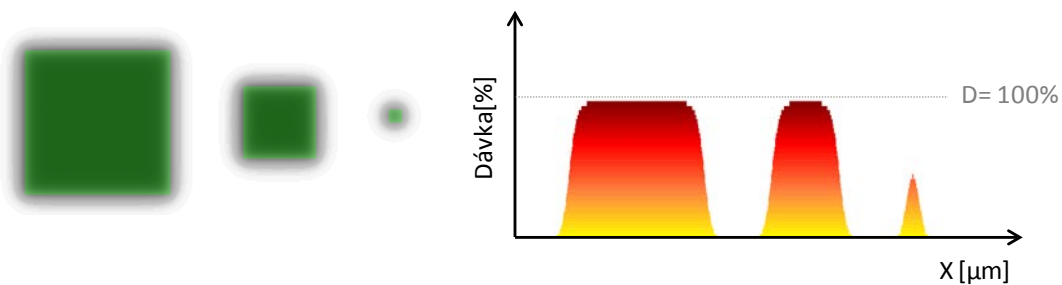
Jak již bylo zmíněno v teoretickém úvodu v kapitole 2.3.2, při zápisu pomocí elektronového svazku dochází při kontaktu elektronů s pevnou látkou k rozptylovým jevům. Tedy, i když je elektronový svazek na povrchu rezistu velmi malého průměru, vlivem rozptylových jevů je výsledná exponovaná oblast v záznamovém materiálu výrazně širší, než je velikost bodového svazku [1], [2], [3], [20].



Obr. 4.2.1 Dopředný a boční rozptyl elektronu v rezistu na podložce působící rozšiřování exponované oblasti v rezistu. Expozice v obrazovém bodě A ovlivňuje obrazový bod B.

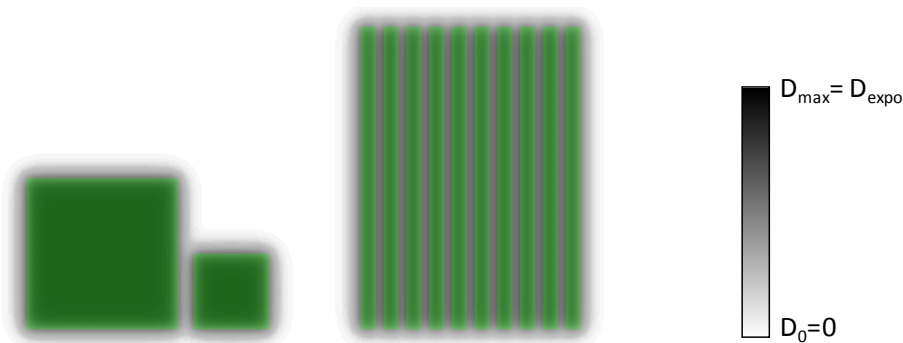
Jev blízkosti elektronového svazku (z anglického *electron beam proximity effect*, dále EBPE) vzniká důsledkem (nelineárních) trajektorií energetických elektronů respektive sekundárních elektronů, které jsou jimi vybuzeny. EBPE způsobuje, že během zápisu dochází k ovlivňování sousedních expozic, a to až do vzdálenosti desítek mikrometrů od pozice, kde svazkem působíme, viz Obr. 4.2.1. Prakticky tak dochází k neuniformní absorpci hustoty energie v rámci exponované pevné látky. EBPE ovlivňuje zejména zápis objektů submikronových rozměrů.

Z hlediska zápisu objektů lze rozlišovat působení EBPE buď v rámci samostatně stojících objektů, nebo objektů, které sousedí v těsné blízkosti jiného objektu. V případě zápisu samostatných objektů dochází v důsledku EBPE k rozptylu absorbované energie do okolí objektu, viz Obr. 4.2.2. To způsobuje, že výsledný tvar se po vyvolání může jevit menší nebo potřebuje delší dobu vyvolání. Čím menší zapisovaný objekt je, tím vyšší dávkou musí být exponován, aby byl vyvolán stejně, jako je rozměrově větší objekt. Pokud bychom zapisovali obraz s velkými rozdíly v dimenzích zapisovaných objektů se stejnou dávkou, malé objekty by se při procesu vyvolávání buď nevyvolaly skrze celou tloušťku rezistu, nebo by dalším vyvoláváním došlo k převyvolání větších objektů.



Obr. 4.2.2 Příklad distribuce energie v ploše pro různě velké samostatně stojící objekty exponované stejnou základní expoziční dávkou; profil distribuce absorbované energie.

Pro druhý typ obrazů, které obsahují objekty v těsné blízkosti, způsobuje EBPE interakci mezi expozicemi obou objektů (viz Obr. 4.2.3) čímž může docházet k akumulaci rozptýlené absorbované energie v mezeře mezi nimi, a při vyvolávání může dojít ke slití sousedních objektů do jednoho většího. Podobně v případě velmi jemného motivu typu difrakční mřížky může dojít k ovlivnění hloubky mřížky nebo až ke slití sousedních čar, a tím může dojít k destrukci mřížkového motivu.



Obr. 4.2.3 Projev EBPE při zápisu objektů těsně sousedících: vlevo dvě sousední plochy; vpravo objekt typu mřížka; zeleně jsou znázorněna obrazová data (exponovaná oblast); šedě je znázorněno rozložení reálné absorbované energie v ploše.

Pro popis rozptylových jevů, tj. způsobu jak bude ovlivňovat bodová expozice své okolí, se osvědčil model rozptylové funkce (PSF z angl. *point spread function*) se dvěma Gaussovými funkcemi:

$$PSF(r) = \frac{1}{1 + \eta} \left(\frac{1}{\pi\alpha^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\alpha^2}\right) + \frac{\eta}{\pi\beta^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\beta^2}\right) \right). \quad (4.2.1)$$

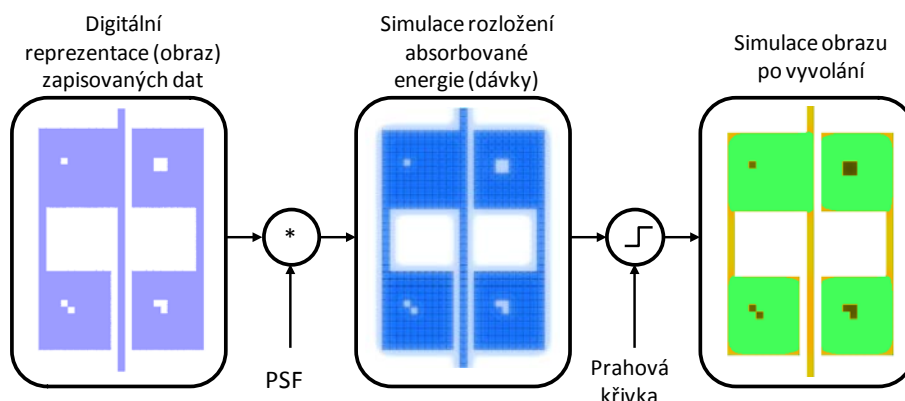
Tento model popisuje distribuci absorbované energie v látce ve vzdálenosti r od bodu působení svazku primárních elektronů. Jedná se o superpozici dvou Gaussových funkcí, kde první funkce popisuje dosah dopředného rozptylu elektronů pro danou tloušťku rezistu a urychlovací napětí. Konstanta α má typicky rozměr řádu jednotek až stovek nanometrů. Druhá funkce s konstantou β , má šířku v řádu jednotek až desítek mikrometrů. Popisuje vliv zpětně odražených elektronů (BSE), a je závislá na urychlovacím napětí a typu materiálu

rezistu a podložky. Parametr η určuje poměr mezi energií absorbovanou z BSE a z primárních elektronů.

Prvním krokem k možnosti kompenzace jevu blízkosti je pochopení, jaké bude rozložení absorbované energie pro obraz vzoru, který chceme pomocí EBL zaznamenat. Ideální je možnost zobrazení přímo v návrhovém a simulačním prostředí, kdy je možné upravovat parametry expozice. V následujících kapitolách práce je myšlenka simulace a kompenzace EBPE dále rozebrána a to pro případ binárních i víceúrovňových typů struktur.

4.2.2 Simulace jevu blízkosti u EBL BS600 pro binární struktury

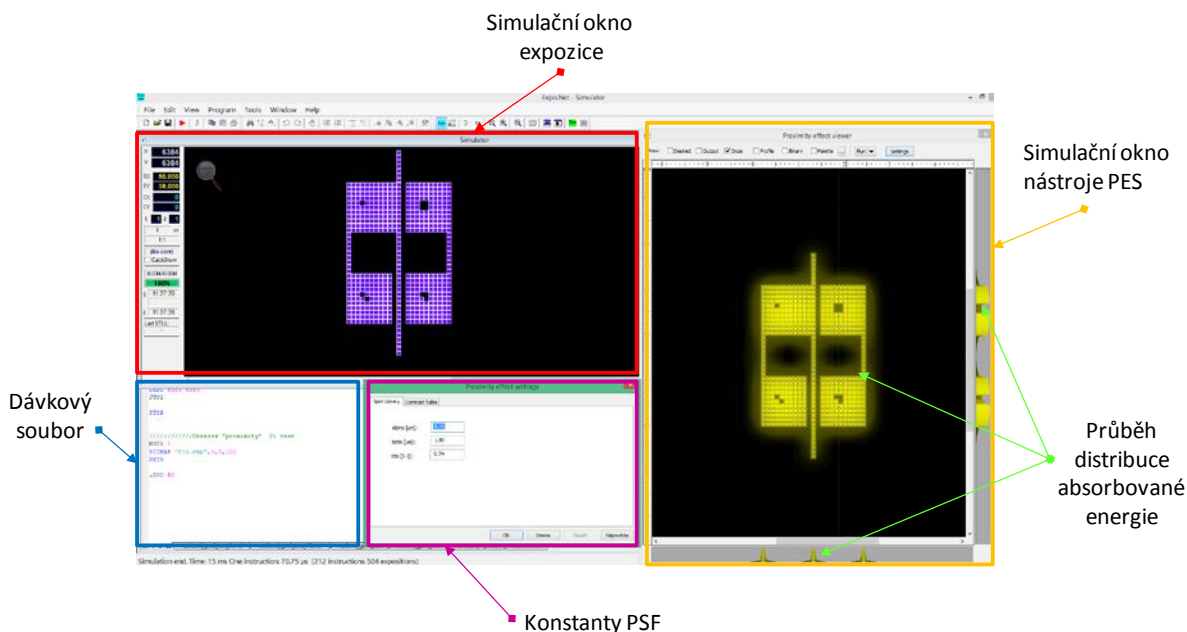
Pro simulaci EBPE u binárního typu struktur jsme využili dekonvoluce vstupních obrazových dat s vypočtenou rozptylovou funkcí (PSF) tvořenou dvěma Gaussovými funkcemi. Princip zpracování obrazových dat a simulace distribuce absorbované energie je popsán schematicky na Obr. 4.2.4. Implementací algoritmu do návrhového prostředí programu Expo.NET (za spolupráce se společností Eltek s.r.o.) vznikl nástroj simulující jev blízkosti (*Proximity Effect Simulator*, PES). Tento nástroj umožňuje zobrazení rozložení absorbované energie pro daný obrazový vstup.



Obr. 4.2.4 Koncepce algoritmu pro simulaci absorbované energie a simulace obrazu po vyvolání.

Dalším krokem bylo rozšíření nástroje PES o simulaci struktury po vyvolání. Toho jsme docílili aplikací prahové funkce na obraz absorbované energie. Jako prahové funkce využíváme křivku citlivosti pro daný rezist a proces vyvolávání. Výsledkem simulace je hloubková mapa vstupního obrazu. Princip simulace obrazu struktury po vyvolání je popsán na Obr. 4.2.4 vpravo.

Nástroj PES byl implementován do programového prostředí Expo.NET jako sekundární simulační okno, které umožňuje zobrazení rozložení absorbované energie pro analyzovaný obrazový prvek a další analýzu obrazu, např. simulaci po vyvolání (viz Obr. 4.2.5). Okno nástroje PES umožňuje zobrazení a simulaci energetických / dávkových profilů v oblasti o velikosti $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$.



Obr. 4.2.5 *Nástavba programového prostředí Expo.NET s nástrojem PES.*

Vstupními parametry nástroje PES pro simulaci distribuce absorbované energie jsou koeficienty PSF funkce α , β a η . Parametry β a η jsou experimentálně odvozeny. Parametr α lze matematicky odvodit z funkce pro efektivní průřez svazku:

$$\alpha = 0,9(R_t/E_0)^{1,5}, \quad (4.2.2)$$

kde R_t je tloušťka rezistu v nanometrech a E_0 je energie elektronů v keV.

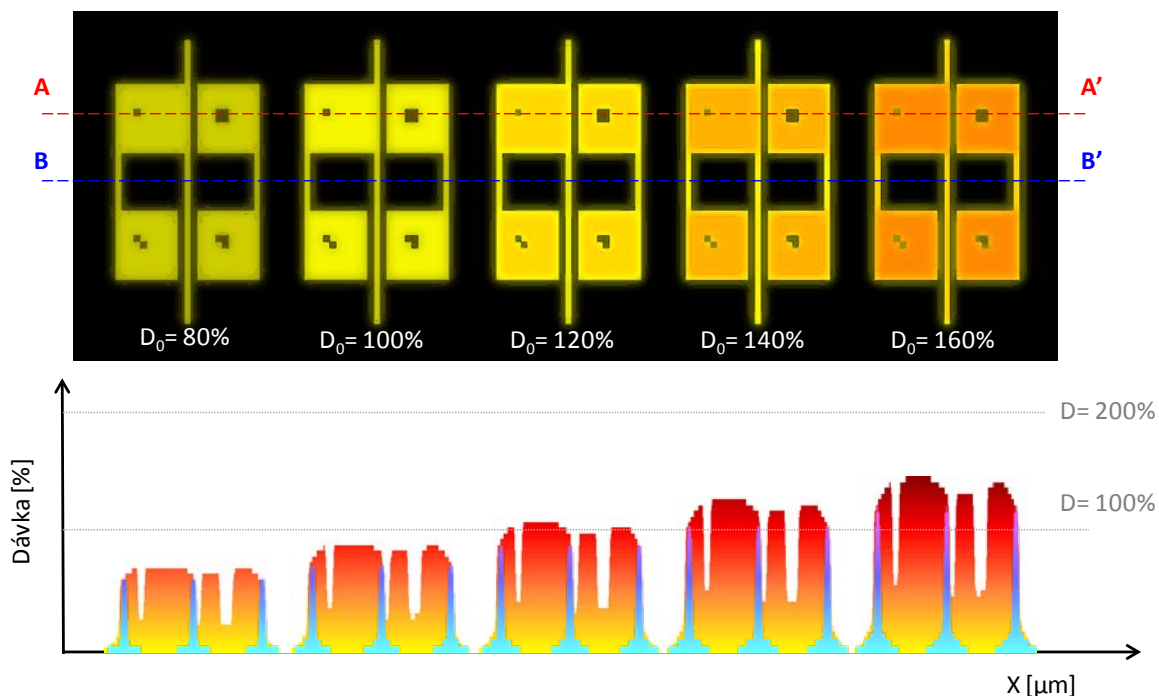
Příklady vypočtených a odvozených rozptylových parametrů pro různá urychlovací napětí ukazuje Tab. 4.2.1.

Tab. 4.2.1 *Rozptylové parametry pro různá urychlovací napětí.
Pro tloušťku rezistu 0,5 μm a křemíkovou podložku [6].*

Energie elektronů (keV)	α (μm)	β (μm)	η -
5	1,33	0,18	0,74
10	0,39	0,6	0,74
20	0,12	2	0,74
50	0,024	9,5	0,74
100	0,007	31,2	0,74

První studie ověřující funkčnost algoritmu PES proběhla na obrazových datech testu EBPG. Před realizací zápisu na ELG proběhla simulace těchto podkladů v nástroji PES. Pro simulaci byly použity parametry $\beta = 1,2 \mu\text{m}$, $\eta = 0,74$ hodnoty těchto koeficientů byly odvozeny v dřívějších pracích případ zařízení zapisujícího elektrony s urychlovacím napětím 15 keV (ELG TESLA BS600) do rezistu PMMA naneseného na křemíkovou podložku [M25], [M43], [M48]. Pro koeficient α byla použita teoretická hodnota odvozena

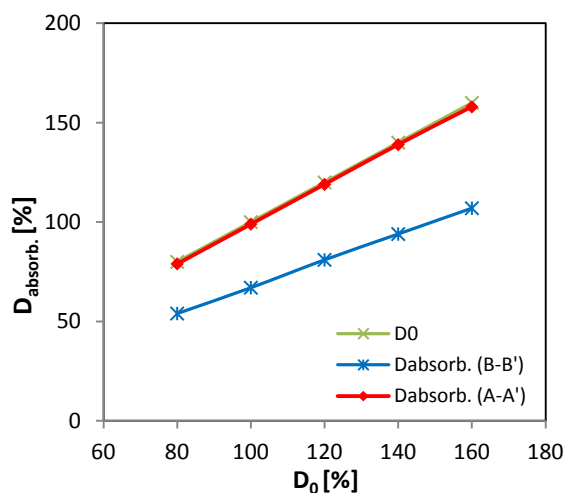
z rovnice Y1 pro tloušťku rezistu 330 nm, tj. $\alpha = 0,09 \mu\text{m}$. Příklad simulovaného rozložení absorbované energie pro obrazce z testu EBPE zapsané svazkem o velikosti $0,5 \mu\text{m}$ jsou prezentovány na Obr. 4.2.6.



Obr. 4.2.6 Motiv testu EBPE pro ověření funkce PES: rozložení absorbované energie v ploše (nahore) pro různé základní expoziční dávky; dávkový profil z řezu A–A' a z řezu B–B' (dole). Simulováno pro parametry: $\alpha = 0,09 \mu\text{m}$; $\beta = 1,2 \mu\text{m}$ a $\eta = 0,74$. Jak je ze simulovaných dat patrné, tak u testovaného obrazce je v části motivu reprezentovaného čtvercovými plochami (řez A–A') relativně homogenní rozložení absorbované energie (dávky) téměř odpovídajícího programově nastaveným dávkám, viz Tab. 4.2.2 a Obr. 4.2.7. Na druhou stranu, v části motivu se samostatnými linkami (řez B–B') je absorbovaná energie značně rozptýlená do okolí struktury, a tím je výsledná dávka výrazně nižší.

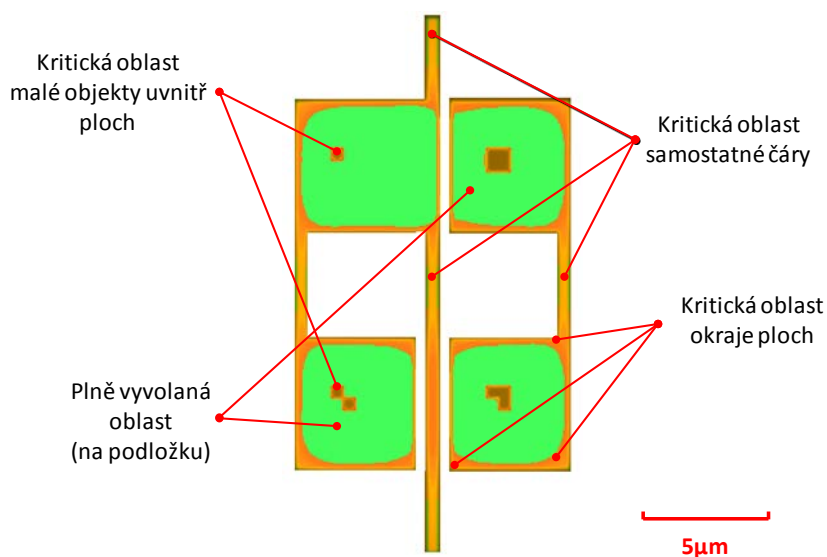
Tab. 4.2.2 Hodnoty programových expozičních dávek D_0 a dávek skutečně absorbovaných dle výpočtu PES v částech obrazu v řezech A–A' a B–B'. ($D_0 = 100\%$ $\Rightarrow D = 30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$).

D_0 (%)	$D_{\text{absorb. (A-A')}}$ (%)	$D_{\text{absorb. (B-B')}}$ (%)
80	79	54
100	99	67
120	119	81
140	139	94
160	158	107



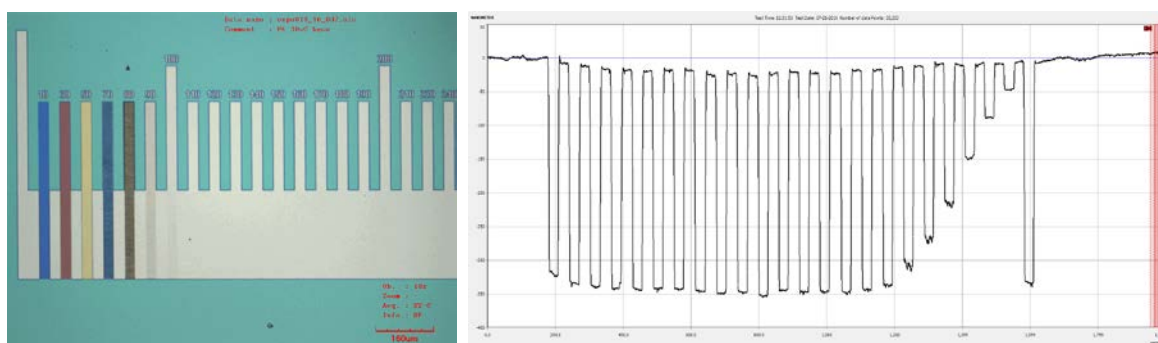
Obr. 4.2.7 Závislost programových hodnot expozičních dávek a skutečných absorbovaných dávek vypočtených v PES v řezu A–A', B–B'.

Pokud se pustíme do úvahy, jak bude obrazec testu EBPE vypadat po vyvolání dle simulované dávkové distribuce pro prahovou dávku rovnou čistící dávce $D_s = 30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ($D_0 = 100\%$), tak pro motivy exponované programovými dávkami 80 % až 100 % ($D = \{24; 30\} \mu\text{C}/\text{cm}^2$) by mělo platit, že otvory v rezistu nebudou zcela vyvolané (tj. nebudou sahát až k podložce). Pro dávku 120 % ($D = 36 \mu\text{C}/\text{cm}^2$) bude část motivu vyvolaná v rezistu dosahovat až k podložce, a to uvnitř čtvercových ploch. V případě samostatných čar budou pro tuto dávku v motivu stále zbytky rezistu. Pro programové dávky 140 % a 160 % ($D = \{42; 48\} \mu\text{C}/\text{cm}^2$) dojde k vyvolání rezistu až k povrchu podložky i v rámci samostatných čar. Nicméně současně může dojít k převyvolání části struktury, například v rámci čtvercových ploch, případně k rozměrové deformaci či rozpuštění malých neexponovaných objektů uvnitř čtvercových ploch. Kritické oblasti na motivu PE testu jsou popsány na Obr. 4.2.8.

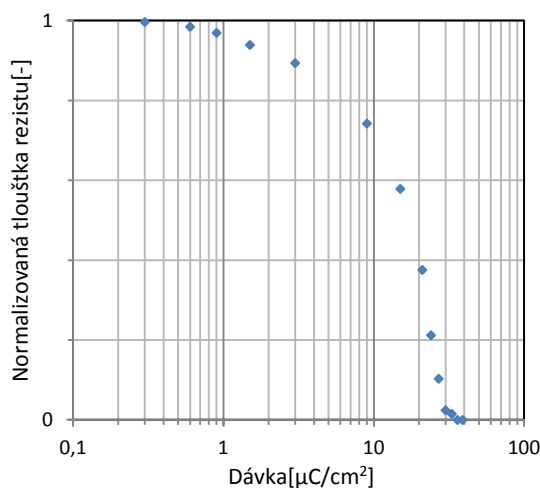


Obr. 4.2.8 Zobrazení kritických oblastí v obrazci PE testu při jeho vyvolávání.

Další část experimentu se věnuje testování té součásti nástroje PES, která umožňuje simulaci procesu vyvolávání obrazových struktur. Pro tento účel byly využity obrazové podklady testu EBPE, na kterých již byla předtím simulována distribuce absorbované energie. Aby bylo možné přistoupit k simulaci je v první řadě nutné změřit křivku citlivosti rezistu na vzorku se záznamem testu citlivosti. Tento test obsahuje plochy exponované s různým součinitelem základní dávky, viz Obr. 4.2.9. Přesné měření struktury testu citlivosti bylo provedeno na kontaktním profilometru Alpha-Step A120 značky KLA-Tencor. Odečtením hloubek pro jednotlivé části profilu z testu a přiřazení příslušných dávek byla zkonstruována tabulka a následně křivka citlivosti, viz Obr. 4.2.10. Proložení lineární části křivky přímkou jsme odečetli hodnoty dávek D_s a D_I . Jejich hodnoty byly použity pro stanovení kontrastu rezistu dle vzorce (2.3.6).



Obr. 4.2.9 Motiv testu citlivosti rezistu PMMA MW=950k se základní expoziční dávkou $30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ (vlevo) a odpovídající profilometrické měření ze zařízení Alpha-Step 120 KLA-Tencor (vpravo).



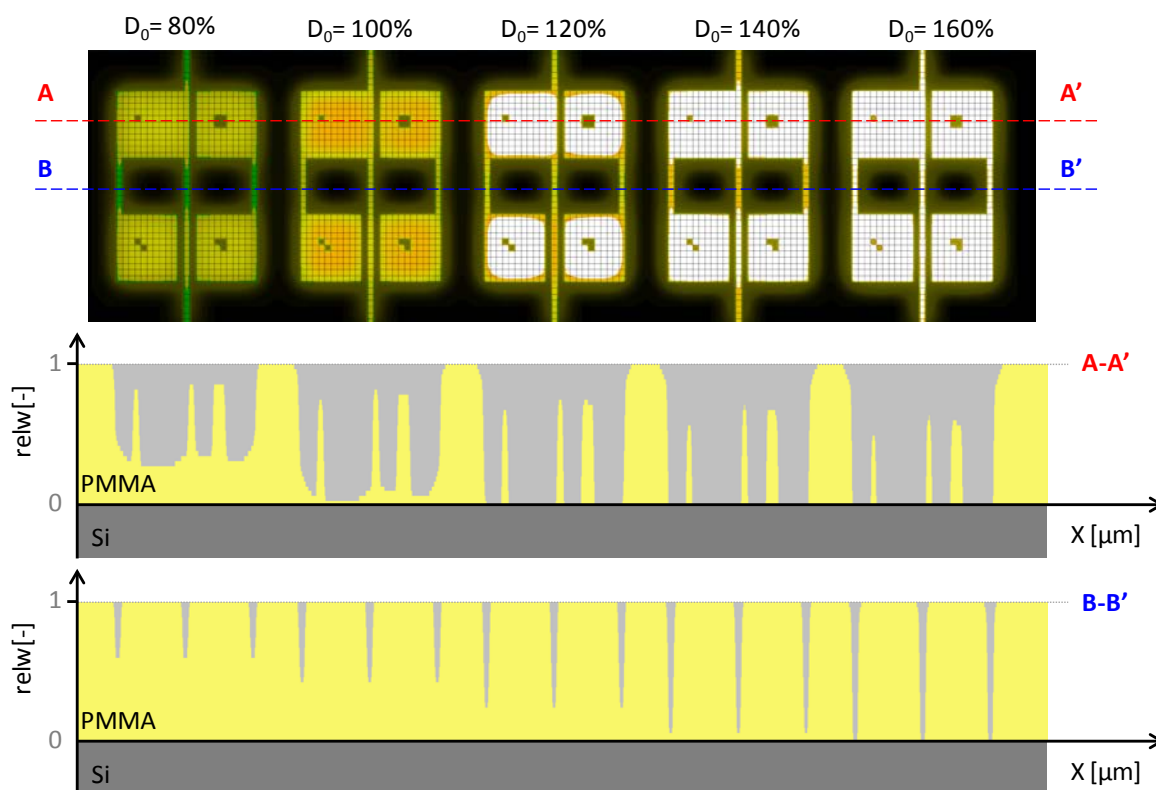
Obr. 4.2.10 Průběh křivky citlivosti rezistu PMMA MW = 950k ($w \approx 300 \text{ nm}$) pro vývojku nAAc s dobou vyvolávání 170 s. Odečteno měření z křivky citlivosti exponované základní dávkou $30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ (15 keV); kontrast rezistu $\gamma \approx 2,2$.

Aby bylo možné použít změřenou křivku citlivosti jako prahovou funkci pro simulaci obrazu struktury po vyvolání v rámci nástroje PES, bylo třeba změřenou křivku aproximovat funkcí, která bude tvarově co nejlépe odpovídat jejímu průběhu. V našem případě byla dostatečná aproximace polynomem 4. stupně (4.2.3), viz vzorec (4.2.4).

$$f(x) = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e \quad (4.2.3)$$

$$relw(D) = 1e-6 D^4 - 6e-5 D^3 + 8e-4 D^2 - 0,0299 D + 0,9944 \quad (4.2.4)$$

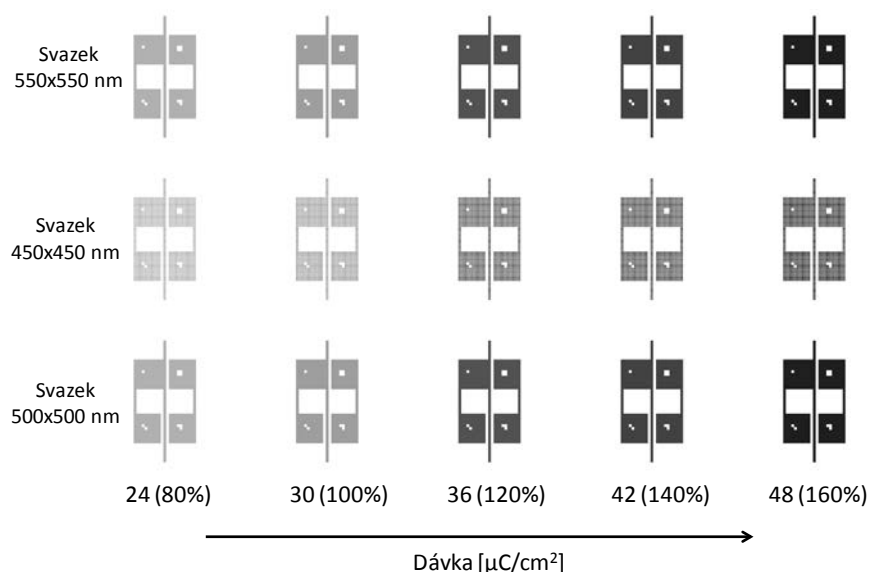
Odvozená rovnice polynomu byla využita k vytvoření tabulky hodnot udávajících průběh prahové křivky. Tato tabulka byla následně použita v nástroji PES k simulaci hloubkového profilu u obrazových dat testu EBPE. Simulacemi byla prokázána přítomnost kritických oblastí na testovacích obrazcích popsaných na Obr. 4.2.8 a odlišné chování při vyvolávání různých částí motivu jak ukazuje simulace na Obr. 4.2.11. V řezech přes plochu (A–A') a přes motiv samostatných linek (B–B') můžeme pozorovat rozdílnou relativní hloubku $relw$, které bude při vyvolávání těchto částí dosaženo.



Obr. 4.2.11 Simulace vyvolání motivu v nástroji PES pro různé dávky při aplikaci prahové funkce exponenciálního tvaru s hodnotou kontrastu $\gamma = 2,2$ ($\alpha = 0,1 \mu m$; $\beta = 1,2 \mu m$; $\eta = 0,74$).

Dalším krokem byla snaha ověřit správnost simulací obrazových dat testu EBPE v nástroji PES. Toho bylo dosaženo záznamem obrazových dat testu EBPE na křemíkovou podložku s monovrstvou PMMA 950k MW ($w \approx 330 \text{ nm}$). Design testu obsahoval matici testovacích obrazců (známých z předchozí simulace) s rozmítáním programových dávek v každém sloupci matice, viz Obr. 4.2.12. Jednotlivé řádky matice pak zahrnovali rozmítání rozměru zápisového svazku o $\pm 50 \text{ nm}$ pro eliminaci možné chyby nastavení rozměru svazku před zápisem. Další část testu obsahovala obrazce pro ověření nastavení parametrů optické soustavy elektronového litografu a technologické testy pomáhající při řízení procesu vyvolávání. Pro účely srovnání byl motiv testu EBPE zapsán svazkem o velikosti

$1\text{ }\mu\text{m} \times 1\text{ }\mu\text{m}$, $0,5\text{ }\mu\text{m} \times 0,5\text{ }\mu\text{m}$ a $0,25\text{ }\mu\text{m} \times 0,25\text{ }\mu\text{m}$, tj. s mikronovým a submikronovým rozlišením.



Obr. 4.2.12 Obrazové podklady testu EBPE pro ověření funkce algoritmu PES.

Zápis motivu testovacích obrazců proběhl na elektronovém litografu s tvarovaným svazkem Tesla BS600 pracujícího s elektrony o energii 15 keV. Před expozicí byla optická a tvarovací soustava zařízení nastavena tak, aby bylo pokud možno co nejhomogennější rozložení proudové hustoty pro svazky velikosti $1\text{ }\mu\text{m} \times 1\text{ }\mu\text{m}$ a $0,5\text{ }\mu\text{m} \times 0,5\text{ }\mu\text{m}$, viz Tab. 4.2.3. Rozptyl hodnoty proudové hustoty před zápisem testu EBPE pro použité rozměry svazků byl $< 10\%$.

Tab. 4.2.3 Proud a proudová hustota pro různé rozměry expozičních svazků před expozicí.

Rozměr svazku	Proud	Proudová hustota	Odchylka
[μm]	[nA]	[A/cm^2]	[%]
3 x 3	5,22	0,0513	95,8
1 x 1	0,567	0,0567	100
0,5 x 2	0,595	0,0595	105
2 x 0,5	0,562	0,0562	99
0,5 x 0,5	0,151	0,0605	107

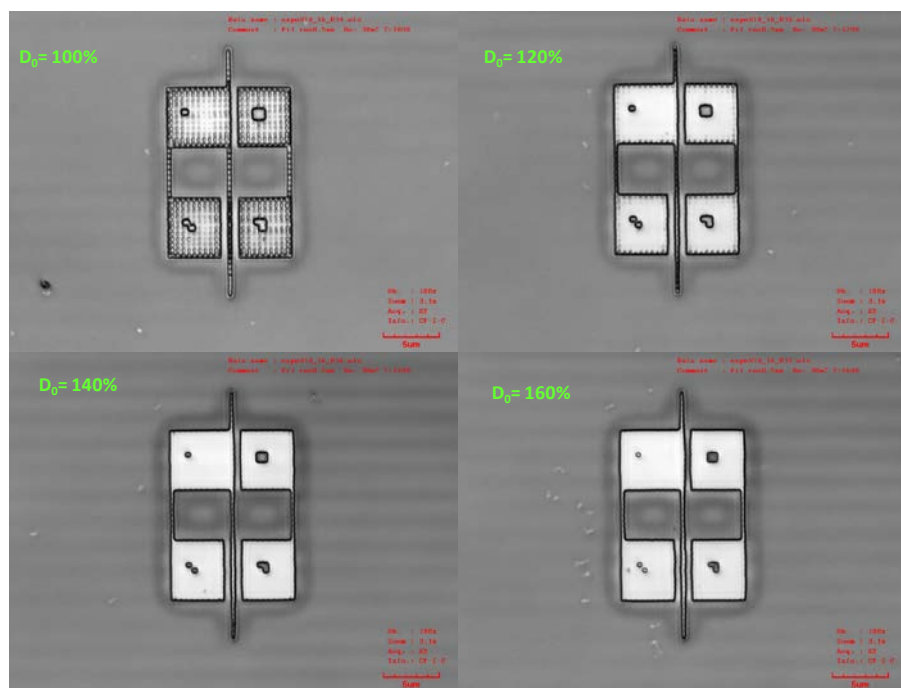
Aby bylo možné ověřit úvahu týkající se způsobu vyvolávání mikrostruktur zapsaných v testu EBPE, byl vzorek po expozici vyvolán tak, aby čistící dávka D_s byla rovna hodnotě $30\text{ }\mu\text{C}/\text{cm}^2$, tj. stejná hodnota pro kterou proběhly obě simulace. Toho bylo docíleno postupným vyvoláváním vzorku v několika krocích. Aby se docílilo co nejpřesnějšího vyvolání na danou dávku, probíhala mezi jednotlivými kroky vyvolávání kontrola plošného testu citlivosti na optickém mikroskopu. Samotné vyvolávání probíhalo na odstředivce a metodou imerze. Tato metoda je založena na nanesení "kaluže" vývojky na vzorek s exponovaným rezistem a odstředění vývojky po požadované době působení. Proces je dokončen osušením vzorku čistým stlačeným vzduchem (CDA, z angl. *compressed dry air*).

Postup se opakuje do té doby, dokud není dosaženo požadované čisticí dávky. Podmínky vyvolávání vzorku jsou popsány v Tab. 4.2.4.

Tab. 4.2.4 Podmínky vyvolávání vzorku s testem EBPE. Vývojka *n*-Amylester kyseliny octové (nAAC).

Pořadí	Vývojka	Čas	Teplota	D_s	D_s
-	-	[s]	[°C]	[%]	[$\mu\text{C}/\text{cm}^2$]
1	nAAC	60	23,4	185	55,5
2	nAAC	40	23,5	150	45
3	nAAC	40	23,5	120	36
4	nAAC	15	23,6	110	33
5	nAAC	10	23,6	100	30

Analýza obrazových motivů vzorku po vyvolání byla provedena na konfokálním laserovém rastrovacím mikroskopu (CLSM). Jak je patrné na Obr. 4.2.13, tak se potvrzuje předpoklad vycházející ze simulace v PES. K vyvolání obrazového motivu testu EBPE ve všech jeho částech dochází až pro expozici s dávkou $D_s = 48 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ($D = 160 \%$). Pro tuto dávku však současně dochází k částečné ztrátě obrazových informací u malých objektů uvnitř velkých ploch a k tvarové deformaci (zaoblení) velkých čtvercových ploch v důsledku předávkování. Pro všechny nižší dávky je obrazec testu EBPE vždy alespoň částečně se zbytky rezistu v motivu.

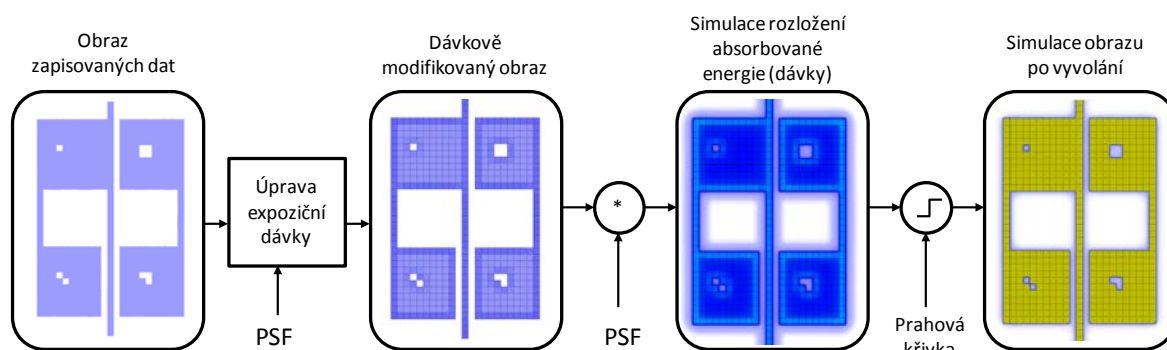


Obr. 4.2.13 Srovnání motivu testu EBPE, pro programové dávky $D_0 = 100 \%$, 120% , 140% a 160% ($D_{100\%} = 30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$).

Srovnání simulovaných a skutečných profilů u testovaných objektů, při aplikaci odpovídající prahové křivky a zvolené rozptylové koeficienty, ukazují, že výsledek simulace obrazu po vyvolání v PES je téměř identický s obrazem struktury zaznamenaného vzorku po vyvolání.

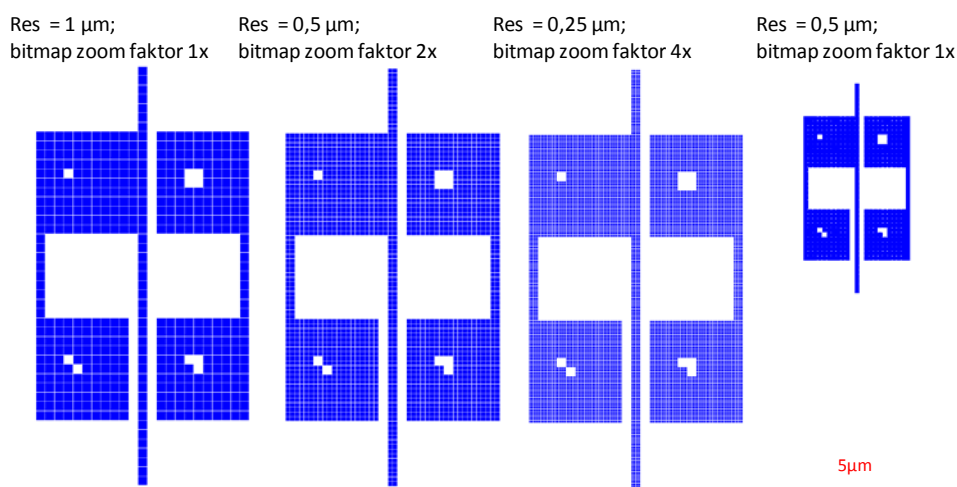
4.2.3 Korekce rozptylu elektronů — případ binární expozice

Pokud se chceme při výrobě mikrostruktur vypořádat s jevem blízkosti, ideální je provést korekce zápisových dat již v průběhu jejich návrhu a simulace. Jedna z metod korekce využívá modelu distribuce absorbované energie z *PSF* pro úpravu datových vstupů pro elektronový litograf. Ačkoli existují různé algoritmy korekce jevu blízkosti (*Proximity Effect Correction*, PEC), všechny většinou vycházejí z jednoho základního principu modifikace základní expoziční dávky (expozičního času) pro každou elementární expozici resp. pixel zapisovaného obrazu (viz Obr. 4.2.14).



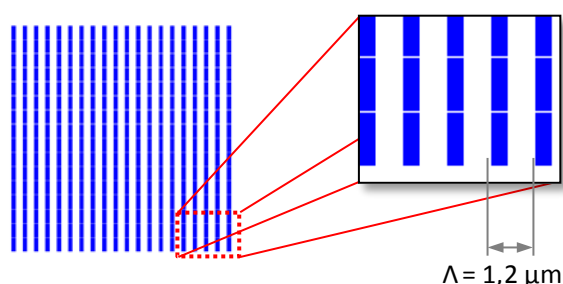
Obr. 4.2.14 Koncepce algoritmu PEC pro korekce dávek binárních struktur.

Modul pro PEC binárních struktur byl přidán jako nástavba PES v rámci programového prostředí ExpoNET. V původní zjednodušené formě pracoval tak, že umožnil modulaci programové dávky (resp. expozičního času) pro každý expoziční bod, resp. obrazový bod, aby bylo dosaženo takového dávkového ozáření jednotlivých částí obrazu, které povedou k jejich sjednocenému vyvolávání [M25]. Tento fakt je obzvláště důležitý při tvorbě binárních masek v rezistu pro další opracování povrchu substrátu, funkčních vrstev nebo depozici vrstev (*lift-off*). Popsaný přístup PEC je unikátní tím, že výpočtový algoritmus pracuje při korekci dávek se svazkem pravoúhlého tvaru proměnných rozměrů.



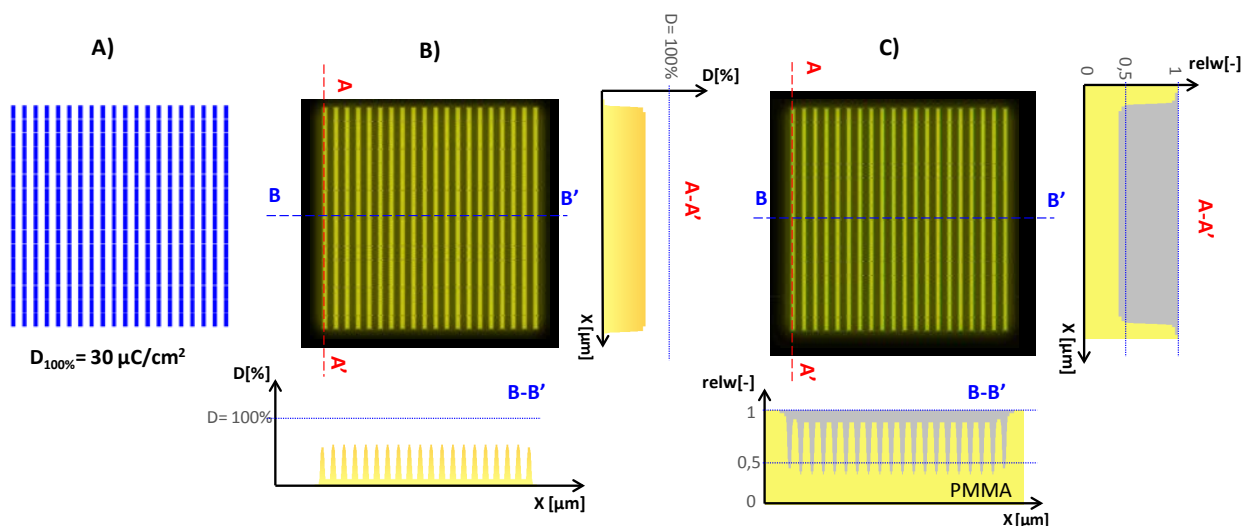
Obr. 4.2.15 Obrazové podklady "Fi testu" pro experimentální ověření funkčnosti PEC.

V prvním kroku experimentu proběhla studie funkčnosti PEC algoritmu na obrazovém motivu obsahující mikrostruktury exponované čtvercovým svazkem o velikosti strany $1\text{ }\mu\text{m}$, $0,5\text{ }\mu\text{m}$ a $0,25\text{ }\mu\text{m}$, viz Obr. 4.2.15. Pro jednotlivé zápisové rozlišení byly vygenerovány datové bitmapy příslušné velikosti. Tato testovací struktura sloužila k ověření vlivu rozlišení obrazu, resp. zápisového rozlišení na přesnost dávkové korekce. Druhá část testu obsahoval mikrostrukturu, jejíž nejmenší detail (čára, mezera) byl v submikronové oblasti (zápisové rozlišení $0,5\text{ }\mu\text{m}$). Tato struktura sloužila k ověření korekce PEC na obrazovém motivu, jenž je v důsledku svého rozměru velikosti konstant PSF již silně ovlivněn rozptylovými jevy, tj. na hranici možnosti zápisu. Třetí část testu obsahoval strukturu mřížkového typu jejíž design je zobrazen na Obr. 4.2.16.



Obr. 4.2.16 Struktura typu binární mřížka pro testování funkce PEC: perioda čar $1,2\text{ }\mu\text{m}$, střída $5 : 7$; zápis svazkem obdélníkového tvaru se stranou $a = 0,5\text{ }\mu\text{m}$ $b = 1,5\text{ }\mu\text{m}$

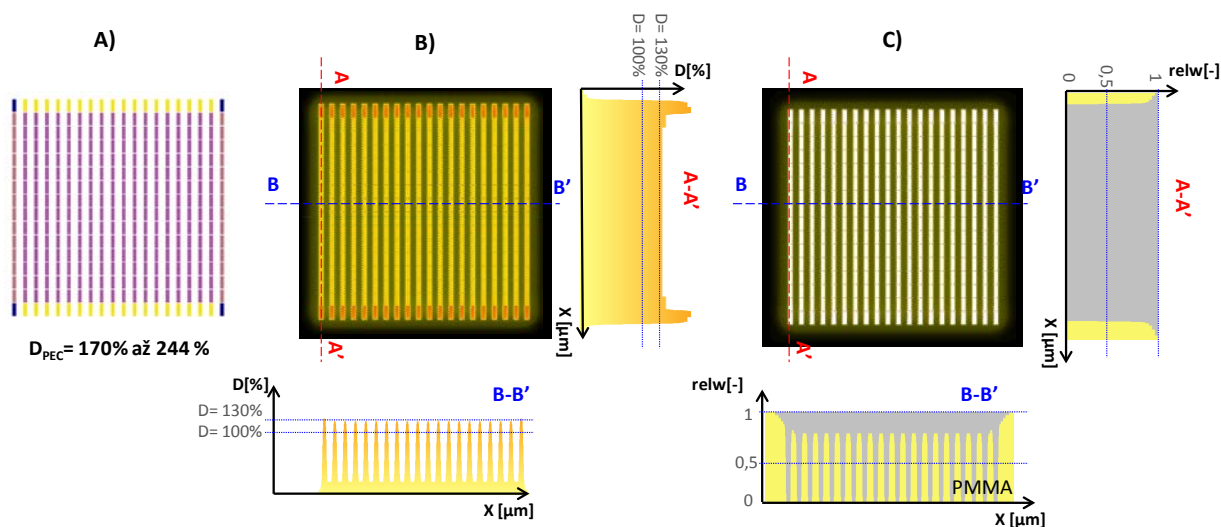
Před realizací zápisu na EBG BS600 proběhla simulace všech výše zmíněných obrazových podkladů v nástroji PES. Pro simulaci i korekci byly použity hodnoty konstant PSF: $\beta = 1,2\text{ }\mu\text{m}$, $\eta = 0,74$ a $\alpha = 0,1\text{ }\mu\text{m}$.



Obr. 4.2.17 Simulace rozložení abs. energie v PES pro motiv binární mřížky bez korekce EBPE. A) motiv mřížky s programovou dávkou $D_{100\%} = 30\text{ }\mu\text{C}/\text{cm}^2$, B) Simulace skutečné absorbované energie z PES, C) Simulace vyvolávání pro křivku citlivosti s $D_s = 30\text{ }\mu\text{C}/\text{cm}^2$, $\gamma = 2,2$.

Příklad simulovaného rozložení absorbované energie a simulace vyvolávání pro strukturu typu binární mřížka bez korekce EBPE je prezentován na Obr. 4.2.17. Před simulací byla

pro motiv nastavena programová expoziční dávka $D_{100\%} = 30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$. Pro simulaci vyvolávání byl použit model křivky citlivosti systému: PMMA MW = 950k ($w \approx 300 \text{ nm}$), vývojka nAAc, $t = 170 \text{ s}$, $T = 23,5^\circ\text{C}$, $D_s = 30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, $\gamma = 2,2$. Jak je na Obr. 4.2.17B patrné dle simulace dochází u motivu mřížky k značnému rozptylu energie do okolí mřížky a do mezer mezi čarami. Tento fakt snižuje dávku ozáření v motivech čar až o 40% tj. z programově nastavené dávky $30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ dojde v rámci čárového motivu k ozáření jen na úroveň $18 \mu\text{C}/\text{cm}^2$. Ze simulace vyvolávání (viz Obr. 4.2.17, část C) můžeme pozorovat, že struktura mřížky bude při vyvolávání ($D_s = 30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$) dosahovat jen do hloubky 50 % tloušťky vrstvy rezistu pro okrajové oblasti a 60% pro oblasti uvnitř plochy mřížky. To je v případě, že mřížka tvoří například masku po další opracování povrchu podložky zcela nepřipustné. Modulační expozičních dávek je tedy v tomto případě zcela na místě.

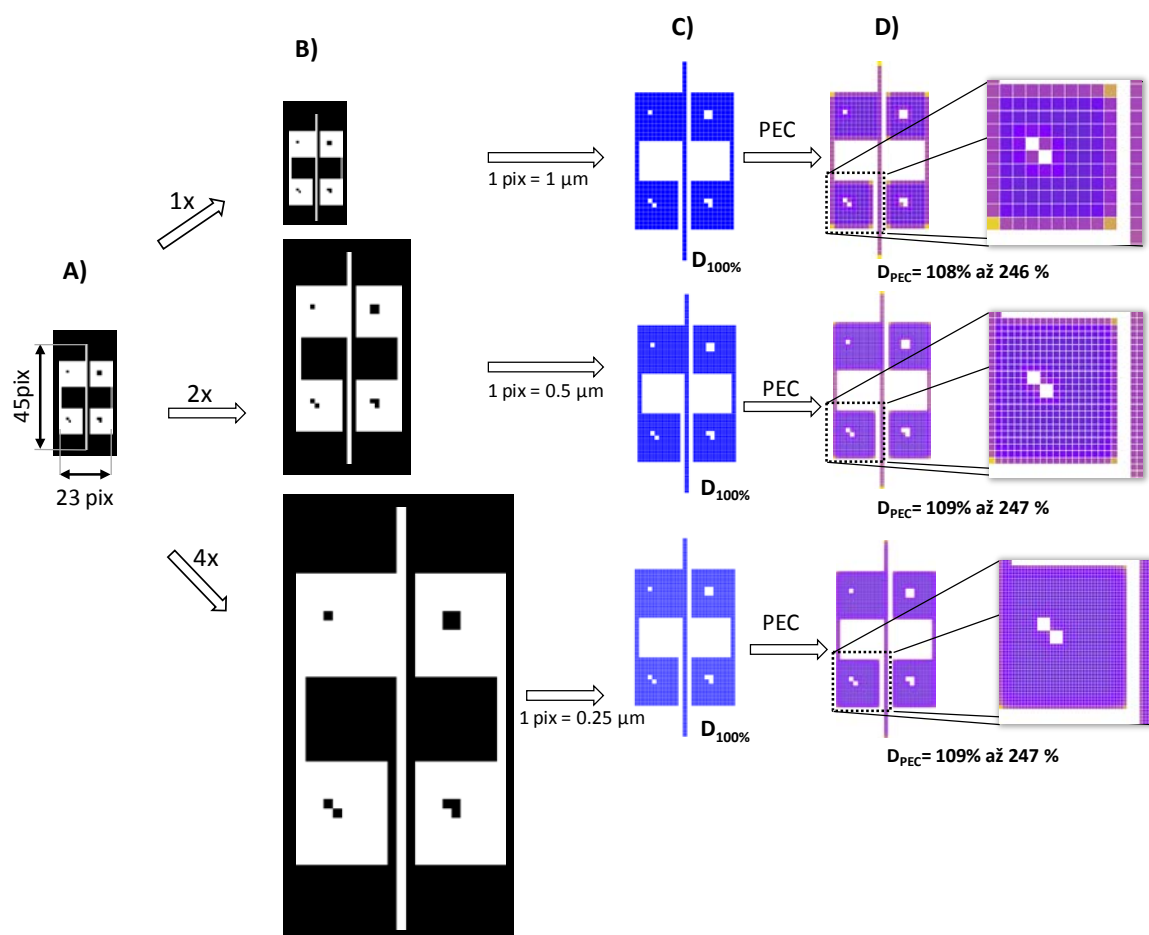


Obr. 4.2.18 Simulace struktury s motivem mřížky modifikované PEC. A) motiv mřížky po aplikaci PEC, B) Simulace dávky ozáření PEC modifikované mřížky v PES, C) Simulace vyvolávání PEC modifikované mřížky pro křivku citlivosti s $D_s = 30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, $\gamma = 2,2$.

Následně byl na strukturu s mřížkou aplikován korekční výpočet dávek v PEC (viz Obr. 4.2.18, část A), v průběhu kterého došlo k modulaci dávek jednotlivých expozičních bodů. Rozsah programových dávek pro jednotlivé body mřížky se změnil z původní hodnoty na programové dávky z rozsahu 170–244 %, které odpovídali dávkám ozáření 51 až $73,2 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, resp. 1,7 až 2,5 násobnému zvýšení expozičního času pro jednotlivé jednotkové expozice. Na výše zmíněné PEC modifikované struktuře proběhla simulace rozložení absorbované energie/dávky ozáření, viz Obr. 4.2.18 (část B). Z této simulace je zřejmé zvýšení úrovně ozáření v jednotlivých čarách mřížky i v okrajových bodech mřížky. Hladina ozáření v celé ploše mřížky neklesá pod úroveň 130 %, tj. $39 \mu\text{C}/\text{cm}^2$. To znamená, že při vyvolávání struktury při $D_s = 30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ lze v každé jednotlivé čáře motivu mřížky očekávat úplné rozpuštění rezistu. Tento fakt potvrzuje i simulace vyvolávání. Jistý negativní vliv celkového zvýšení úrovně expozice v motivu mřížky je patrný při srovnání původních a PEC modifikovaných dat na neexponovaných mezerách mezi čarami mřížky. Pro PEC modifikovanou strukturu dochází v této oblasti k rozpouštění většího objemu rezistu.

Důvodem zvýšení dávky ozáření těchto regionů mřížky je způsobené zvýšení dávky ozáření čarách

a tedy i vyšší úrovni dávky ozáření, která je rozptýlena vlivem EBPE.

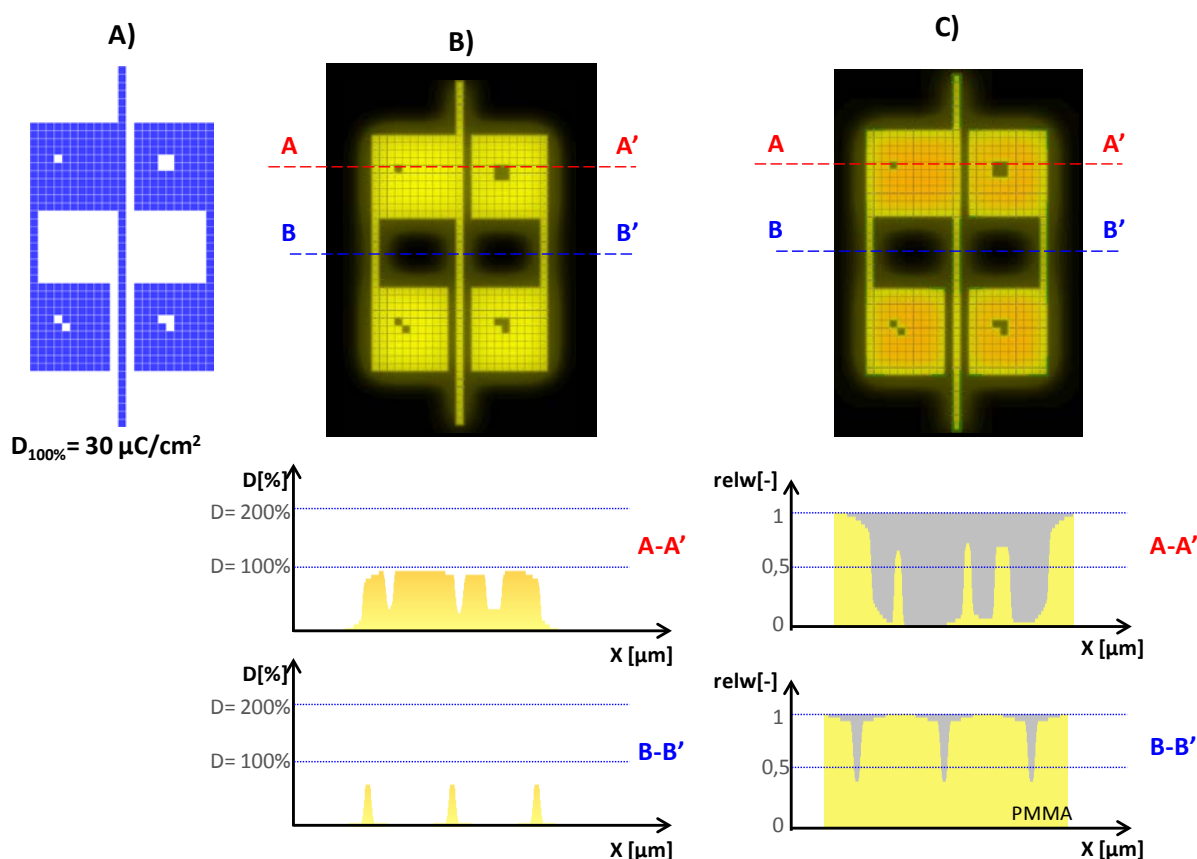


Obr. 4.2.19 Princip konverze tří datových bitmapy na expoziční data s PEC dávkovou optimalizací. A) Vstupní B/W datová bitmapa s motivem Fi testu, B) Resamplovaná bitmapa pro tři zvolená submikronová rozlišení zápisu, C) Konverze bitmapy, D) Dávkově optimalizovaný obraz.

Dalším krokem studie bylo testování PEC algoritmu na datových vstupech definovaných datovou bitmapou a srovnání vlivu různých rozlišení grafického vstupu na výsledný obraz a jeho dávkový profil. Jak už bylo zmíněno v úvodu kapitoly, pro experiment byl zvolen motiv "Fi testu" definovaný datovou bitmapou se třemi různými zápisovými rozlišeními. Aby bylo možné všechny tři mikrostruktury srovnávat, tj. aby měli stejný rozměr, bylo nutné zvětšit datovou bitmapu 2násobně pro zápisové rozlišení 0,5 μm a 4násobně pro zápisové rozlišení 0,25 μm Obr. 4.2.19B. Pomocí překladače v programu ExpoNET došlo k převodu bitmapy do databáze souřadnic expozičních svazek s rozměrem odpovídajícím zvoleným hodnotám rozlišení Obr. 4.2.19C. Následně byla provedena korekce dávek jednotlivých expozičních bodů PEC algoritmem Obr. 4.2.19D. Z detailů obrazů PEC modifikovaných struktur je patrné, že vyšší rozlišení zápisu je umožňuje plynulejší přechod mezi jednotlivými dávkově modulovanými zónami. Nejvýraznější jsou patrné oblasti přechodu mezi exponovanou a neexponovanou plochou (rohy čtvercových ploch). Rozsah dávkové modulace

jednotkových expozic je pro všechny tři rozlišení podobná a to v rozsahu 108 % až 247 %. Nízká hodnota minimální úrovně modulace je dána faktem, že obrazový motiv obsahuje i větší exponované plochy, které profitují z dávky ozáření rozptýlené ze sousedních expozic. Uvnitř těchto ploch je tedy třeba jen nižší amplituda modulace programových dávek. Vyšší amplituda modulace programových dávek je využívána v kritických oblastech, jako jsou samostatné čáry a rohy čtvercových ploch.

Poslední část studie PEC se zabývala simulací struktury v submikronové rozlišení ($0,5\ \mu\text{m}$) a se submikronovými detaily ($\text{MFS} = 0,5\ \mu\text{m}$). Pro případ zvoleného motivu a při daném rozlišení zápisu bylo možné očekávat silné projevy rozptylu dávky ozáření důsledku EBPE. V tomto směru tedy bylo zajímavé provést srovnání obrazu s korekcí a bez korekce EBPE.

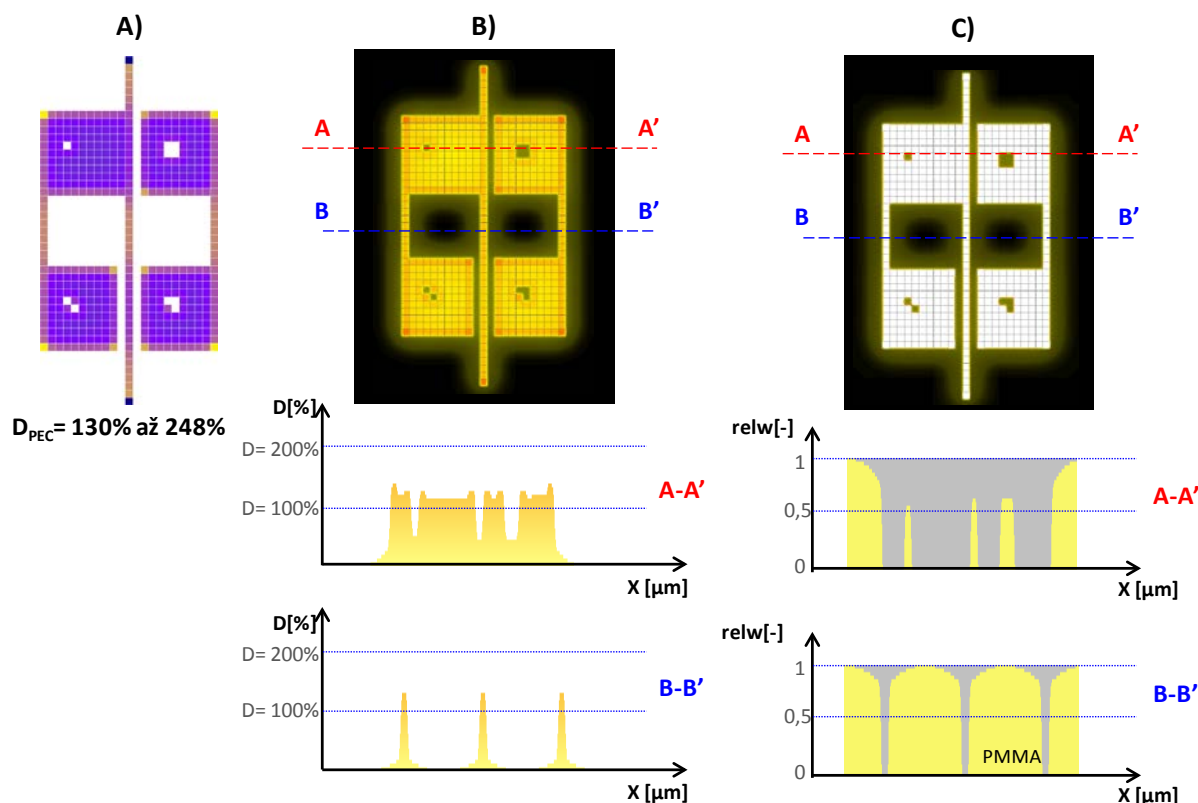


Obr. 4.2.20 Simulace obrazového motivu se submikronovými rozlišením bez aplikace PEC procedury, $\text{res} = 0,5\ \mu\text{m}$. A) Motiv struktury po konverzi z bitmapy s programovou dávkou $D_{100\%} = 30\ \mu\text{C}/\text{cm}^2$; B) simulace skutečné dávky ozáření se zahrnutím EBPE, dávkové profily ve dvou řezech A–A' a B–B'; C) simulace motivu po vyvolávání ($D_s = 30\ \mu\text{C}/\text{cm}^2$, $\gamma = 2,2$).

Simulace struktury bez korekce v PEC je zobrazen na Obr. 4.2.20. Dle simulace dosahuje skutečná dávka ozáření uvnitř větších čtvercovými ploch téměř nastavené programové dávky, viz řez A–A' na Obr. 4.2.20, část B. Naopak u části motivu s osamocenými čarami (viz řez B–B' na Obr. 4.2.20, část B) je skutečná dávka ozáření výrazně nižší ($\approx 60\%$). Simulací vyvolávání můžeme na zvoleném motivu dobře pozorovat, jak v různých regionech motivu dochází k rozpuštění rezistu do jiné hloubky, viz Obr. 4.2.20, část B. Pro sjednocení úrovně

vyvolání lze postupovat buď plošným zvýšením programové dávky tak aby i nejmenší detaily byly vyvolané skrze celou vrstvu rezistu, nebo aplikací PEC procedury.

Simulace EBPE pro dávkově modulovaný motiv je zobrazen na Obr. 4.2.21. Na první pohled jsou patrné oblasti u kterých PEC algoritmus vyhodnotil nutnost výrazného zvýšení programové dávky: samostatné čáry, obrys čtvercových ploch a hrany čtvercových ploch, viz Obr. 4.2.21, část A. Simulace vyvolávání už jen potvrzuje, že ve všech exponovaných částech dávkově modifikovaného motivu dojde k rozpuštění rezistu v celé jeho tloušťce, viz Obr. 4.2.21, část C.



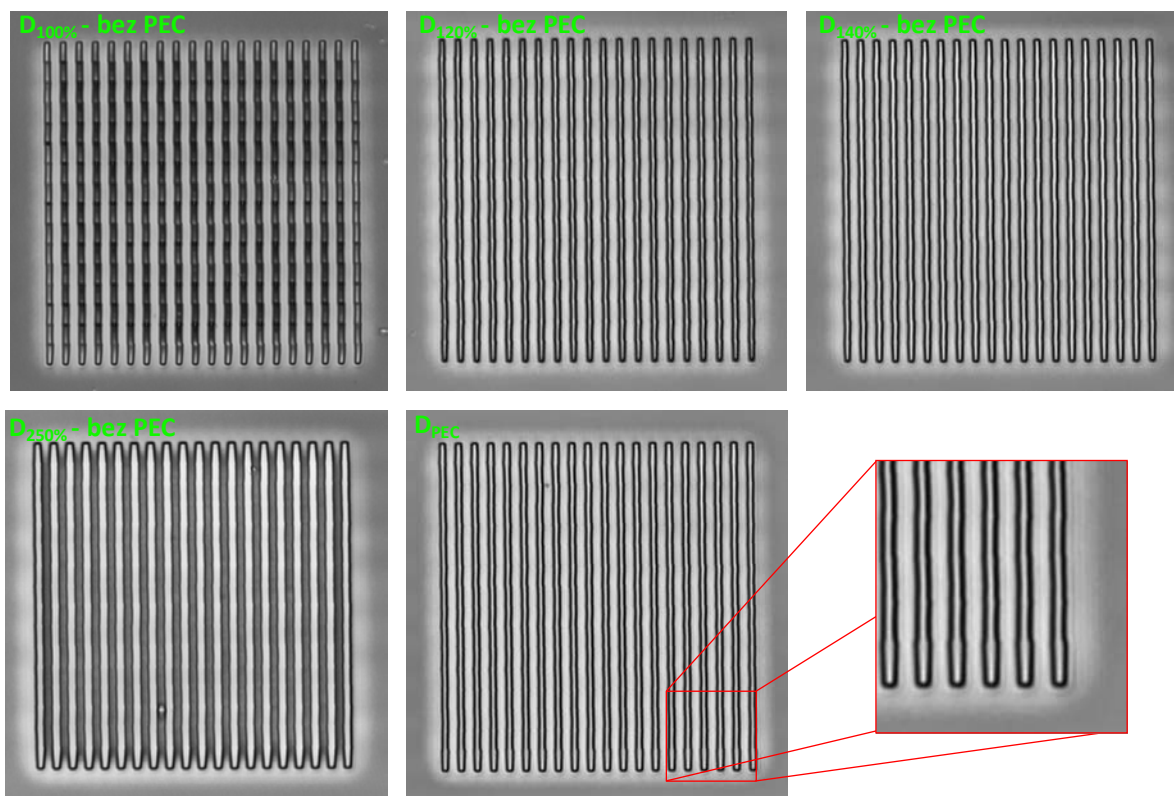
Obr. 4.2.21 Simulace obrazového motivu s PEC modulací dávky. A) Motiv struktury po aplikaci PEC; B) simulace skutečné dávky ozáření se zahrnutím EBPE; C) Simulace vyvolávání ($D_s = 30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, $\gamma = 2,2$).

Finální část experimentu se zabývala praktickou zkouškou ověřující funkčnost PEC korekce na simulovaných strukturách (mřížka, bitmapa). Toho bylo dosaženo záznamem motivů těchto mikrostruktur na křemíkovou podložku s monovrstvou PMMA MW = 950k o tloušťce 300 nm na elektronovém litografu BS600. Po návrhové stránce se test skládal z řady testovacích obrazů s mřížkami exponovaný s i bez aplikace PEC procedury. Motivy bez aplikace PEC byly zaznamenány s programovou dávkou 80, 100, 140, 180 a 250% ($D_{100\%} = 30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$). Důvodem pro volbu takového rozsahu programových dávek byla možnost srovnání, při jaké úrovni dávky ozáření dosáhne motiv úplného vyvolání a pro hodnocení k jaké ztrátě obrazových informací může při záznamu s vyššími dávkami docházet.

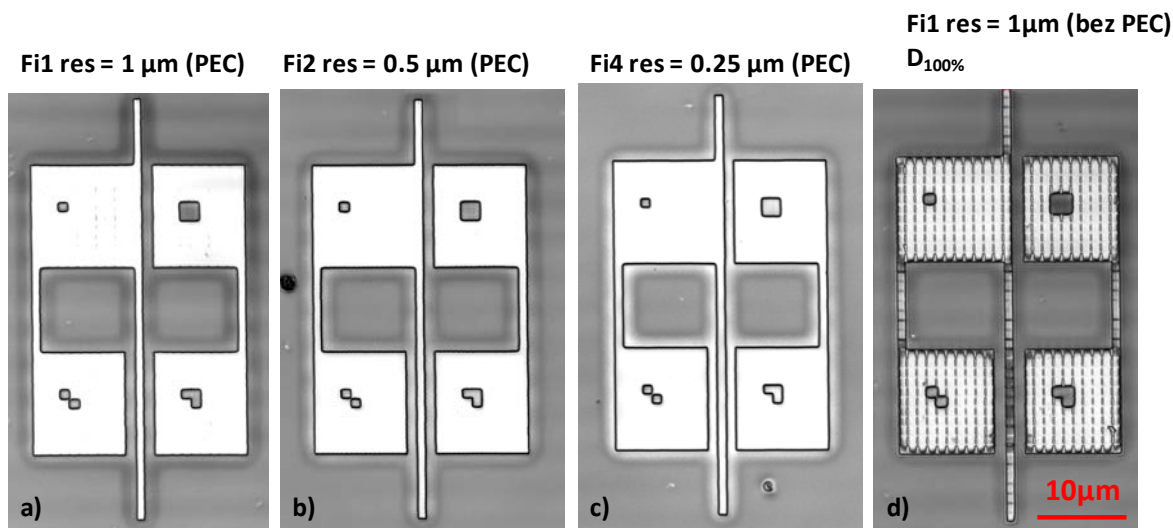
Záznam mikrostruktur proběhl na zařízení ELG BS600, s expoziční dávkou $D_{100\%} = 30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ a $40 \mu\text{C}/\text{cm}^2$. Aby bylo možné srovnat simulované obrazy struktur se obrazy struktur v rezistu vytvořených, byl vzorek po expozici vyvolán tak, aby čistící dávka D_s byla rovna hodnotě $30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, tj. hodnota pro kterou proběhla simulace vyvolávání. Toho bylo docíleno postupným vyvoláváním vzorku a zajištění stabilních podmínek prostředí vyvolávání. Hodnota čistící dávky byla kontrolována mezi jednotlivými kroky vyvolávání v plošném testu citlivosti na optickém mikroskopu. Vyvolávání vzorku proběhlo za následujících podmínek: rozpouštědlo nAAc, vyvolávání imerzí, $t_{\text{celk}} = 170 \text{ s}$, $T = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, počet kroků 4. Měření a vyhodnocení vzorků se zaznamenanými mikrostrukturami následně proběhlo na CLSM značky Olympus.

Na snímcích z CLSM, viz Obr. 4.2.22, můžeme vidět srovnání zápisu motivu mřížky bez korekce procedurou PEC pro různé procentuální hodnoty základní expoziční dávky ($D_{100\%} = 30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$). Je patrné, že pro expozici dávkou $D_{100\%}$, kdy plošná expozice je již na jiných místech vzorku je již plně vyvolaná, nedošlo k rozpuštění vrstvy rezistu až ke křemíkové podložce. Pro dávku $D_{120\%}$ dochází k postupnému obnažování povrchu podložky v motivu čar, které je dokončeno na expoziční dávce $D_{140\%}$. Pro expoziční dávku $D_{140\%}$ je však patrné, že čary na o kraji mřížky jsou užší, stejně tak začátky a konce čar jsou ztenčené. Pro ještě vyšší dávky $D_{250\%}$ je motiv čar plně vyvolán, ale současně dochází k silné tvarové deformaci čar jejím rozšířením. Dobře je zde patrný vliv EBPE, kdy čary uvnitř motivu mají podobnou tloušťku a okrajové čary jsou výrazně tenčí. Stejně platí pro začátky a konce čar, které jsou v rozptylu dávky ozáření do okolí užší. Poslední snímek s označením D_{PEC} reprezentuje strukturu s dávkově optimalizovaným motivem mřížky po proceduře PEC. Jak je patrné motiv čar je po vyvolání plně vyvolaná až na podložku, jednotlivé čary na kraji i uvnitř plochy mřížky mají stejnou tloušťku, došlo také k ošetření začátků a konců čar. Z celkového srovnání zaznamenaných struktur vyplývá, že nejlépe reprezentuje mřížkovou strukturu právě motiv zapsaný s PEC optimalizací dávek.

Výsledek zápisu PEC optimalizovaných struktur definovaných datovou bitmapou se třemi různými rozlišeními zápisu je prezentován na Obr. 4.2.23. Ve všech třech případech jsou všechny části obrazového motivu vyvolány skrze celou tloušťku rezistu. Jen v případě motivu zapsaného s rozlišením $1 \mu\text{m}$ se uvnitř čtvercových ploch objevili male rezidua rezistu v nejspíš dané ne zcela optimálním nastavením velikosti expozičního razítka (nenavazování expozičních bodů). Z hlediska tvarového je nejlépe interpretovaný obrazový zaznamenaný s nejvyšším ze zvolených rozlišení ($0,25 \mu\text{m}$) což je dáno jak jemnějším navazováním expozičních bodů, tak možností plynulejší a optimálnější korekcí dávek jen v nezbytně nutných oblastech mikrostruktury. Pro srovnání je na Obr. 4.2.23 uveden i zápis studovaného motivu bez aplikace dávkové korekce PEC, exponovaný základní expoziční dávkou $D_{100\%} = 30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$.

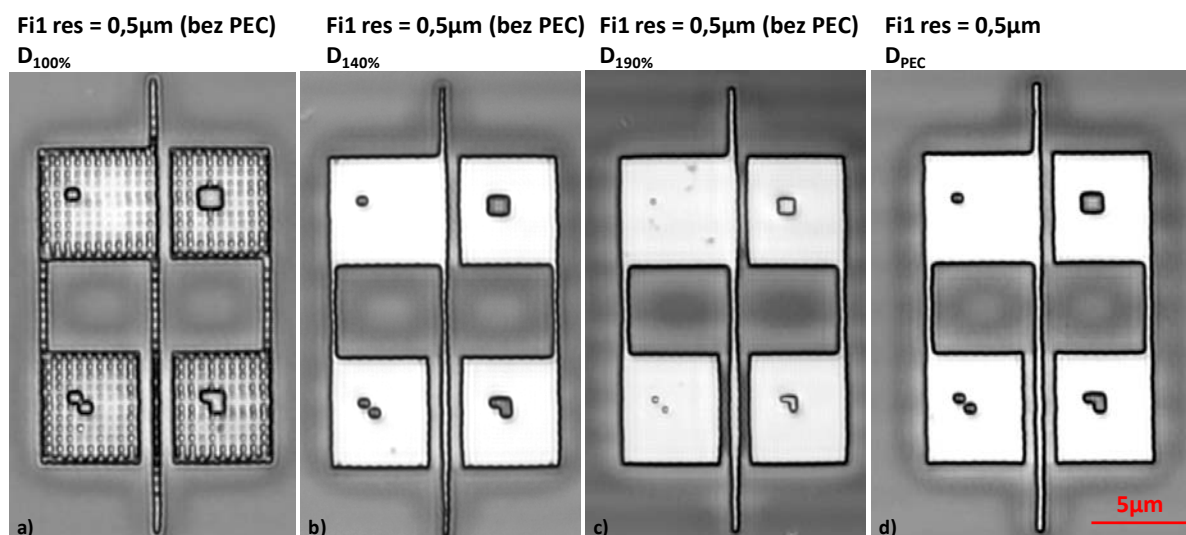


Obr. 4.2.22 Srovnání snímků zaznamenaných mřížkových struktur exponované s různou expoziční dávkou na EBG BS600. Měřeno na CLSM.



Obr. 4.2.23 Srovnání záznamu PEC optimalizovaných struktur definovaných datovou bitmapou pro tři rozlišení zápisu (snímky z CLSM).

Záznam měření z CLSM pro poslední typ studovaných mikrostruktur zaznamenaných se submikronovým rozlišením obsahují submikronové detaily je zobrazen na Obr. 4.2.24. Pro danou velikost mikrostruktury se potvrzuje silný vliv rozptylových jevů. Srovnání snímku z CLSM vidíme, že pouhým zvýšením expoziční dávky nelze řešit kompenzaci pomalejšího vyvolání v některých částech mikrostruktury (samostatné čáry). Pro expoziční dávku ($D_{190\%}$), kdy je konečně dosaženo rozpuštění rezistu v části motivu se samostatnými čarami, dochází již k zaoblování části motivu se čtvercovými plochami (převyvolání). Navíc dochází k úplné ztrátě detailu uvnitř těchto ploch. Na druhou stranu záznam motivu, u kterého proběhla korekce dávek PEC procedurou, viz Obr. 4.2.24 (vpravo), dosahuje velmi dobrých výsledku v interpretaci obrazového podkladu. Ve všech exponovaných bodech došlo k rozpuštění vrstvy rezistu až ke křemíkové podložce, deformace čtvercových ploch je minimální motivy submikronových čar jsou dobře patrné a mají srovnatelnou šířku. Neexponované detaily uvnitř čtvercových ploch jsou poměrně dobře zachovány.

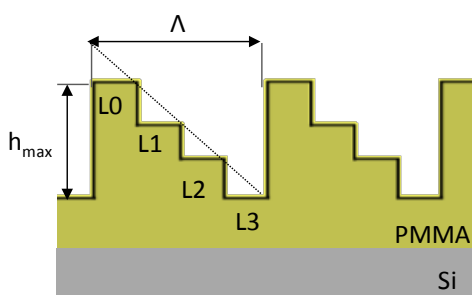


Obr. 4.2.24 Srovnání záznamu struktur zaznamenané se submikronovým rozlišením zápisu s a bez PEC optimalizace (snímky z CLSM).

Závěrem lze konstatovat, že se podařilo na testovacích mikrostrukturách ověřit funkčnost a užitečnost PEC modulace dávek jejich obrazových podkladů. Obzvláště užitečná je PEC optimalizace pro mřížkové typy struktur nebo obecných struktur se samostatnými submikronovými detaily. Tyto totiž vyžadují podstatně vyšší expoziční časy, aby došlo ke kumulaci srovnatelné dávky ozáření jako u záznamu ploch. Korekce jevu blízkosti se po praktické stránce osvědčila při tvorbě binárních masek například pro přenos obrazu mokrým leptáním do oxidu křemíku (SiO_2 , *silicon dioxide*) a reaktivním iontovým leptáním do vrstev nitridu křemíku (Si_3N_4 , *silicon nitride*) nebo tvrdých kovových masek například z Molybdenu (Mo).

4.2.4 Simulace jevu blízkosti pro víceúrovňové struktury

Tato kapitola se věnuje možnostem simulace a korekce rozptylových jevů pro případ víceúrovňových reliéfních struktur zapisovaných elektronovým litografem (ELG) typu BS600. Na rozdíl od struktur binárního typu může docházet v dávkovém gradientu, který tvoří víceúrovňový prvek, k nelineární distribuci absorbované energie. Současně hraje významnou roli při vytváření struktury také tvar křivky citlivosti. Důsledkem toho může být zapsaná struktura tvarově deformovaná nebo s nesprávnou hloubkou [M46]. Při simulaci těchto struktur navazujeme na předchozí kapitolu, která se věnovala EBPE, PES a PEC binárních struktur.



Obr. 4.2.25 Model víceúrovňové struktury mřížkového typu.

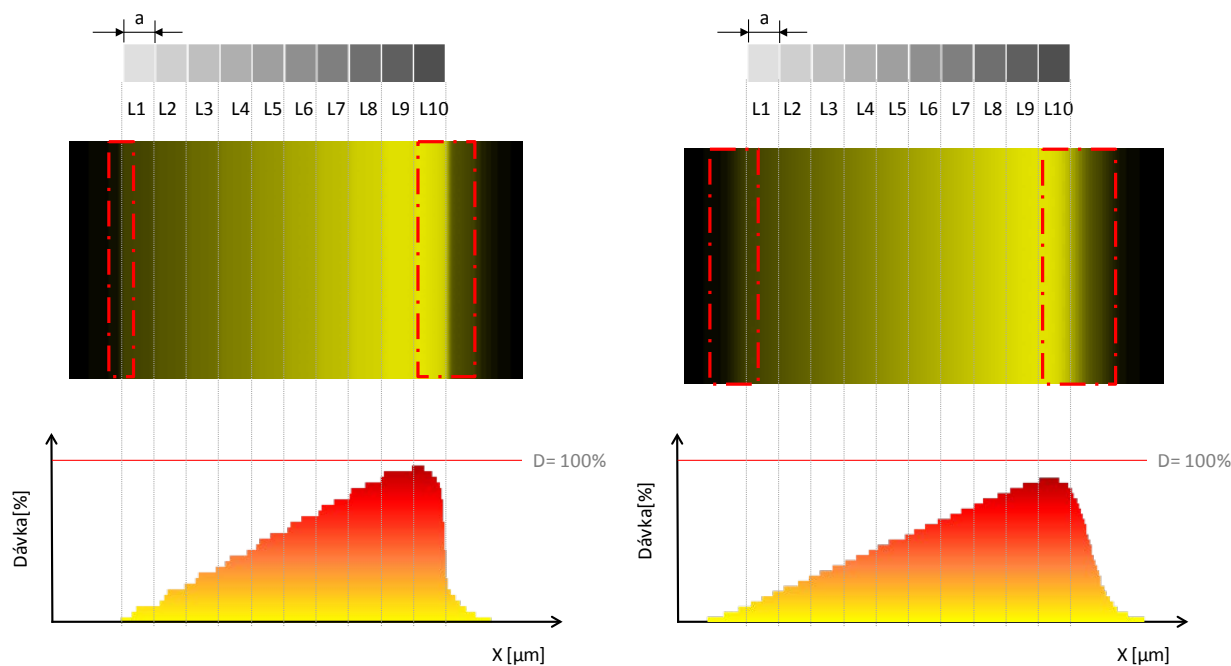
Datová simulace v nástroji PES a experimentální zápis víceúrovňových struktur probíhal na vzorcích mřížek s pilovým profilem, viz Obr. 4.2.25. Důvodem pro volbu tohoto typu vzorků byla možnost jednodušší analýzy profilů mřížek a možnost srovnání měřením difrakční účinnosti na vzorcích mřížek s kompenzovaným a nekompenzovaným dávkovým profilem.

Pro simulaci dávkového rozložení a profilů struktur po vyvolání v nástroji PES byly použity mřížky s pilovým profilem aproximované na schodkovitý profil s jedenácti a šestnácti úrovněmi. Jelikož nás zajímá tvorba struktur v submikronovém rozlišení, byla pro první případ zvolena struktura se šířkou schodku $a = 1,0 \mu\text{m}$, v druhém případě se šířkou schodku $a = 0,6 \mu\text{m}$. Pro dávkový gradient byl zvolen lineární profil.

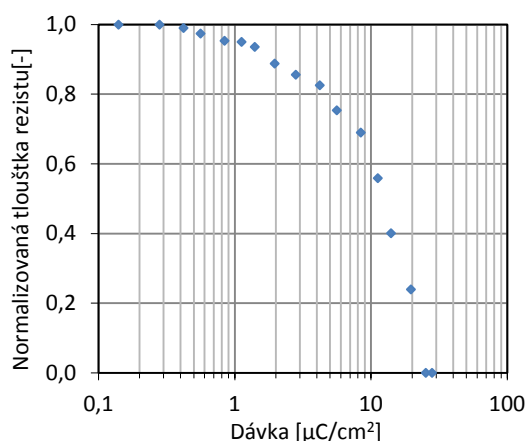
Simulace 11úrovňové struktury proběhla v nástroji PES. Pro simulaci mřížky byly použity koeficienty PSF $\beta = 1,2 \mu\text{m}$, $\eta \approx 0,74$ a koeficienty $\alpha = 0,1 \mu\text{m}$ pro případ simulace rozptylu u povrchu rezistu a $\alpha = 0,49 \mu\text{m}$ pro případ simulace rozptylu ve vyšších penetračních hloubkách ($\approx 1 \mu\text{m}$). Z modelů absorbované energie pro simulovanou strukturu je zřejmé, že problematické regiony jsou zejména na pomezí přechodu mezi 9. a 10. stupněm struktury a dále mezi 10. stupněm a sousední neexponovanou oblastí.

V prvním případě je v důsledku EBPE nevyšší hodnota absorbované energie na rozhraní stupňů 9. a 10. nikoli u 10-tého stupně struktury. Tento pokles absorbované energie je způsoben tím, že poslední exponovaný stupeň struktury (10. stupeň) má sousední expozici jen z jedné strany (z druhé strany sousedí s neexponovanou plochou). Stejný problém je patrný u prvního stupně struktury, nicméně z důvodu nízké expoziční dávky v tomto stupni není jeho projev tak markantní.

Druhý případ souvisí s rozptylem absorbované energie pro neexponované plochy sousedící s 10. stupněm struktury. Šířka zasažené oblasti může být až v řádu jednotek mikronů. Tento fakt může způsobit zaoblení jinak strmé hrany pilového profilu mřížky, případně propad celého profilu mřížky vůči rovině rezistu. Na Obr. 4.2.26 je patrné, že tato oblast přechodu je významnější při zápisu hlubších struktur vlivem změny efektivního průřezu svazku ve vyšších penetračních hloubkách. Na druhou stranu ve větších hloubkách by vlivem rozptylu mohlo docházet k homogenizaci přechodu mezi plošnými expozicemi schodkové aproximace pilového profilu mřížky a tím k vyhlazení profilu a ke zvýšení optické účinnosti mřížky.



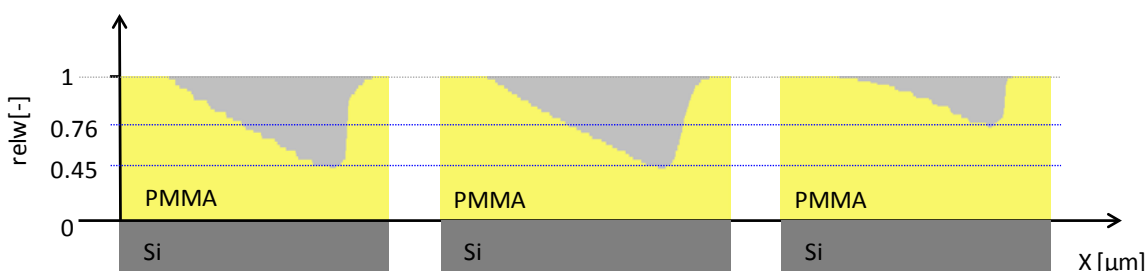
Obr. 4.2.26 Simulace distribuce absorbované energie 11úrovňové struktury pro dvě hodnoty koeficientu dopředného rozptylu: $\alpha = 0,1 \mu\text{m}$ (vlevo), $\alpha = 0,49 \mu\text{m}$ (vpravo).



Obr. 4.2.27 Křivka citlivosti rezistu PMMA MW=350k pro vývojku V11 a dobu vyvolávání 30 s odečtená z křivky citlivosti exponované základní dávku $14 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ (15 keV); kontrast rezistu $\gamma \approx 1$.

Druhá část simulace byla věnována modelování struktury po vyvolání. Vstupem pro PES byla předem změřená křivka kontrastu pro rezist PMMA a vývojku V11 s hodnotou kontrastu $\gamma \approx 1$ a $D_s = 25 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ (Obr. 4.2.27). Pro účely srovnání vlivu sklonu křivky byla při simulaci použita také křivka s exponenciálním průběhem a kontrastem $\gamma = 3$ ($D_s = 25 \mu\text{C}/\text{cm}^2$).

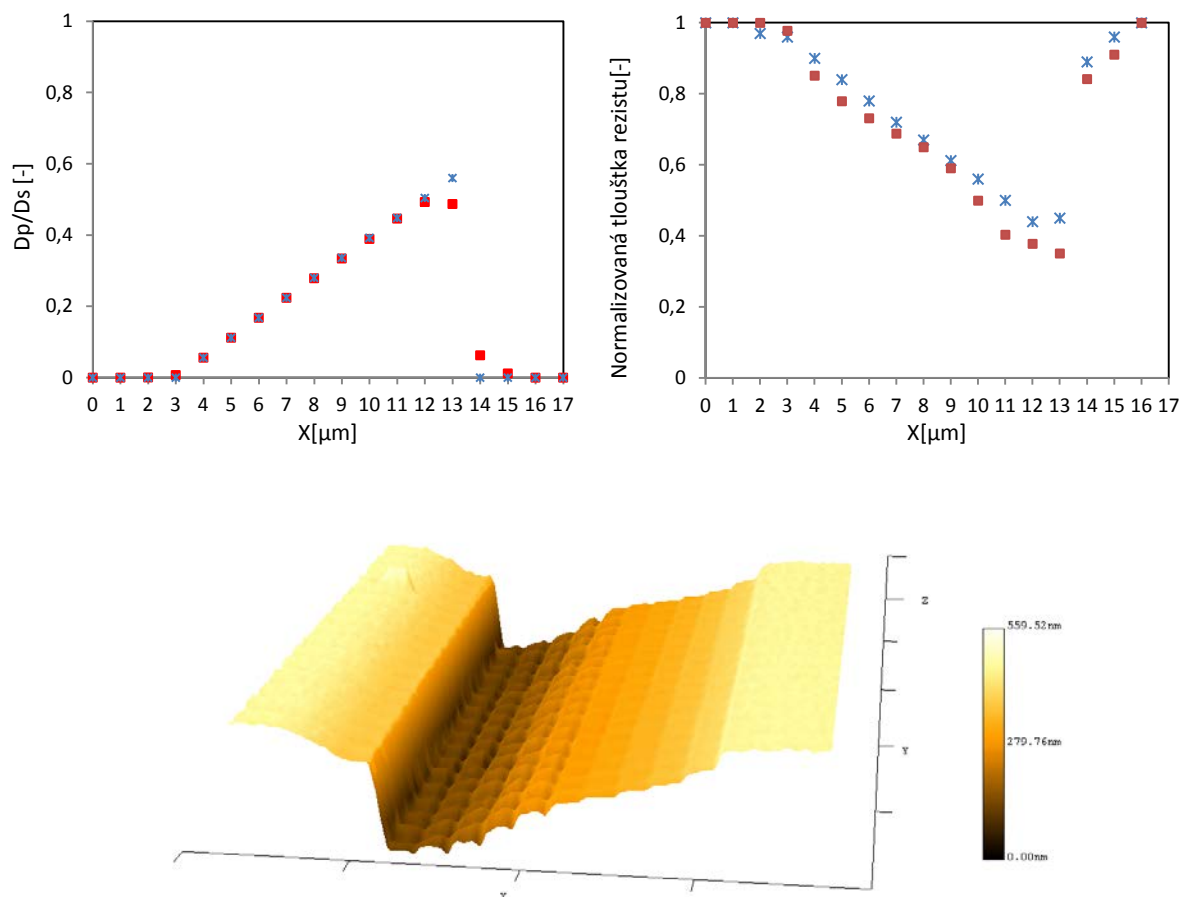
Ze simulovaných modelů (viz Obr. 4.2.28) je zřejmé, že pro malé hodnoty kontrastu rezistu by mělo být možné použití lineárního průběhu programových dávek, aniž by došlo k výraznější deformaci profilu mřížky. Současně však musí být splněna podmínka takového zpracování rezistu, aby se využívalo pracovním okno na křivce citlivosti mimo oblast se strmým průběhem.



Obr. 4.2.28 Simulace profilu z PES pro 11úrovňovou strukturu pro dvě hodnoty koeficientu dopředného rozptylu: $\alpha = 0,1 \mu\text{m}$ (vlevo), $\alpha = 0,49 \mu\text{m}$ (uprostřed) pro křivku $\gamma \approx 1$; referenční simulace pro $\alpha = 0,1 \mu\text{m}$ a $\gamma = 3$ (vpravo).

Na referenčním modelu s křivkou citlivosti s vysokým kontrastem můžeme pozorovat jak nelineární průběh profilu, tak nižší celkovou hloubku při stejné expoziční dávce. Pro dosažení stejného výsledku jako u srovnávaných profilů by bylo nutné upravit expoziční dávky podle průběhu křivky citlivosti tak, aby došlo ke kompenzaci této nelinearity. Pro rezisty s vysokým kontrastem však obecně platí, že nejsou příliš vhodné pro tvorbu 3D struktur v rezistu. Důvodem je velmi malý inkrementální krok mezi jednotlivými dávkami pro jednotlivé úrovně reliéfu s 3D profilem. Složitější se pak stává jak zápis, tak i zpracování vzorku po vyvolání.

Zápis struktury modelované v PES s 11úrovňovou mřížkou (viz Obr. 4.2.29) proběhl na EBL BS600 na křemíkovém vzorku s vrstvou PMMA $MW = 350\text{k}$ ($w = 630 \text{ nm}$). Vzorek byl vyvolán ve vývojce na bázi acetonu metodou "puddle" po dobu 30 s při teplotě $24,5^\circ\text{C}$. Vývojka byla vybrána s ohledem na profil křivky citlivosti, kdy v části křivky po nízké dávky lze dosáhnout relativně nízké úrovně kontrastu rezistu ($\gamma \approx 1$). Vzorek byl vyvoláván podle testu citlivosti tak, aby D_s odpovídala hodnotě $25 \mu\text{C}/\text{cm}^2$. Maximální programová dávka v dávkovém gradientu mřížky při tom dosahovala výše $14 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ($D_{L10} = 100\%$). Důvodem pro volbu takového dávkového gradientu byla snaha o využití té části křivky citlivosti rezistu, jenž vykazuje nízkou hodnotu kontrastu, tj. oblast křivky citlivosti s téměř lineární závislostí hloubky na expoziční dávce. Druhým důvodem byla snaha vytvořit v rezistu strukturu o maximální hloubce cca 500 nm , kdy je předpoklad optimální účinnosti difrakce na mřížce při refrakci světla o vlnové délce 532 nm . U takto vytvořených mřížek lze kvantifikovat jakost vytvořené struktury i po optické stránce.



Obr. 4.2.29 Porovnání profilu 11úrovňové struktury simulovaného v nástroji PES (nahore vlevo) a na AFM měřeného profilu struktury zapsané na ELG BS600 (nahore vpravo). Snímek profilu struktury z AFM (dole) [M46].

Z vyhodnocení testu s 11úrovňovou strukturou je patrné, že pomocí nástroje PES lze odhadnout průběh profilu a hloubku výsledné struktury po jejím zápisu na ELG a vyvolání. Odchytky, které jsou patrné v průběhu profilu simulované a vytvořené struktury mohou souviset s několika faktory. První z nich je spojen se šumem zdroje elektronů u systému ELG BS600, který může způsobovat proudovou odchylku až 15 %. Druhý faktor, který může ovlivnit výsledek, je přenos rozměrového nastavení svazku. Třetí faktor souvisí s rozptylem elektronů a s algoritmem simulace PES. Příčinou je silně nelineární závislost hodnoty absorbované energie na penetrační hloubce Obr. 2.3.8 přičemž nástroj PES tento problém neuvažuje.

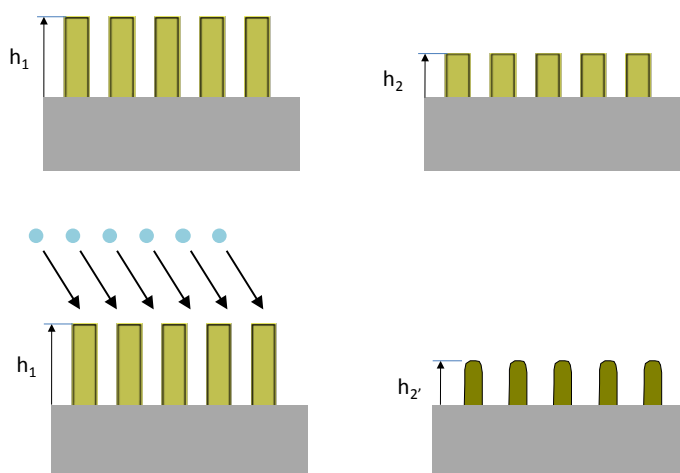
Výsledky vývoje v oblasti PES a PEC optimalizaci dávek mikrostruktur zaznamenávaných na EBG BS600 byly prezentovány ve výzkumné zprávě projektu TIP FR TI1/576 v rámci kterého vývoj probíhal. Jádrem práce bylo také prezentováno v několika publikacích a na několika mezinárodních konferencích [M25], [M43], [M46], [M48]. Výsledek vývoje dal vzniknout programovému modulu umožňující například iterativním postup při dávkové korekci jevu blízkosti, dodatečné ošetření hran a rohů obrazových objektů nebo optimalizaci dávky objektu exponovaných s příliš vysokou dávkou.

4.3 Aplikace plasmatického leptání při výrobě mikrostruktur

Tato kapitola je věnována možnosti využití technologie leptání při výrobě a modifikaci reliéfních mikrostruktur. První část se věnuje možnostem přesného plasmatického ladění výšky rezistu a mikrostruktur v něm zaznamenaných. Druhá část se věnuje charakterizaci procesu leptání křemíku v plasmě na bázi *tetrafluormethanu*, možnostem přenosu a prohlubování obrazu reliéfních mikrostruktur přes leptací masky předem zaznamenané technologií ELB. Třetí část se zabývá technikami mikro a nano–obrábění při výrobě strukturovaných membrán.

4.3.1 Přesné ladění hloubky reliéfu plasmatickou cestou

Pro některé aplikace, kde ve velké míře záleží na přesné výšce mikroreliéfu připraveného v rezistu, je důležitá možnost nastavení výšky reliéfu zaznamenaných struktur. K těmto aplikacím patří například přesné binární optické mřížky pro zpracování koherentního monochromatického světla. Přesného naladění výšky reliéfu lze docílit leptáním povrchu polymeru nesoucího litografický záznam, například plasmochemickým leptáním v kyslíku. Metoda plasmatického leptání se hojně využívá například v procesu výroby integrovaných obvodů pro úpravu nebo odstraňování polymerních leptacích masek [32], [33], [36].



Obr. 4.3.1 Princip plasmatického ladění hloubky reliéfu mikrostruktur: a) relief zaznamenaný s hloubkou h_1 , b) relief požadovaný s hloubkou h_2 , c) plasmatické leptání vzorku, d) vzorek po opracování v plasmě s požadovanou výškou reliéfu h_2 .

V případě aplikace těchto postupů pro úpravu výšky mikrostruktur zaznamenaných v rezistu (viz Obr. 4.3.1) je nutné odpovídajícím způsobem upravit postup při přípravě vzorku. Prvním krokem je nanášení rezistu na podložku, v tomto kroku je třeba zajistit, aby výsledná tloušťka nanášené vrstvy byla alespoň o 5-10 % vyšší, než má být požadovaná výška (hloubka) vytvářené reliéfní struktury. Takto získaná rezerva ve výšce nanášené vrstvy umožní přesné nastavení výšky reliéfní struktury. Při nanášení vrstvy rezistu metodou odstředivého lití, lze vycházet z nanášecích křivek pro daný typ rezistu a koncentraci jeho roztoku. Tyto křivky lze sestavit experimentálně, nanášením vrstvy rezistu pro různé technologické parametry, nejčastěji pro různé parametry otáček odstředivky. Mírným snížením otáček odstředivky lze (snadno a relativně přesně) zvýšit tloušťku deponované vrstvy rezistu o požadovanou úroveň.

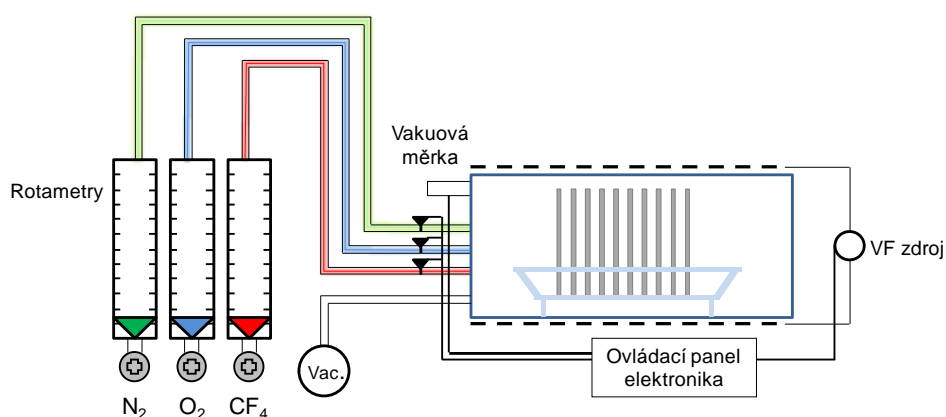
V případě aplikace této metody pro úpravu výšky mikrostruktur zaznamenaných v rezistu (viz Obr. 4.3.1) je nutné odpovídajícím způsobem upravit postup přípravy vzorku. Prvním krokem je nanášení rezistu na podložku, při tom je třeba klást důraz na to, aby výsledná tloušťka nanášené vrstvy byla alespoň o 5% až 10% vyšší než má být požadovaná výška (hloubka) vytvářené reliéfní struktury. Takto získaná rezerva ve výšce nanášené vrstvy umožní přesné nastavení výšky reliéfní struktury. V případě nanášení rezistu metodou odstředivého lití, lze při nanášení vycházet z nanášecích křivek pro daný typ a koncentraci roztoku rezistu. Tyto křivky lze sestavit experimentálně, pokusným nanášením vrstvy pro různé parametry nanášení, nejčastěji pro různé parametry otáček odstředivky. Drobou úpravou hodnoty otáček odstředivky lze tedy snadno a relativně přesně zvýšit tloušťku deponované vrstvy rezistu o požadovanou úroveň.

Dalším krokem je záznam latentního obrazu struktury do rezistu některou z litografických metod následované procesem vyvolání. Reliéf zaznamenané struktury je před leptáním nutné změřit a vyhodnotit například na AFM nebo profilometru. Takto získáme přesné informace o výšce reliéfu zaznamenaného v rezistu.

Samotné nastavení výšky reliéfní struktury v rezistu na požadovanou úroveň probíhá v plasmovém systému aplikací kyslíkové plasmy dle fyzikálního principu detailněji pospaného v kapitole (viz 2.4.2).

Oproti konvenčnímu způsobu odstraňování vrstvy polymeru jsou v tomto případě podmínky uzpůsobeny požadavku na nízkou rychlost leptání, řádově v jednotkách nanometrů za minutu, při současné homogenitě leptání v leptané ploše. Toho lze docílit vhodným nastavením parametrů plasmatického procesu jako je typ reakčního plynu, VF výkon, teplota, tlak a průtok plynu.

V rámci experimentu byly zkoumány možnosti výškového nastavení reliéfních struktur připravených v pozitivním rezistu PMMA a negativním rezistu SU-8 na křemíkové podložce za pomoci elektronové litografie. Leptací proces na vzorcích s výše zmíněnými vrstvami proběhl v plasmatickém reaktoru barelového typu značky TESLA 214VT pracující s indukčně buzenou plasmou s budicí frekvencí 13,56 MHz s vysokofrekvenčním výkonem až 250 W. Schematické uspořádání použitého plasmatického reaktoru je znázorněno na Obr. 4.3.2.

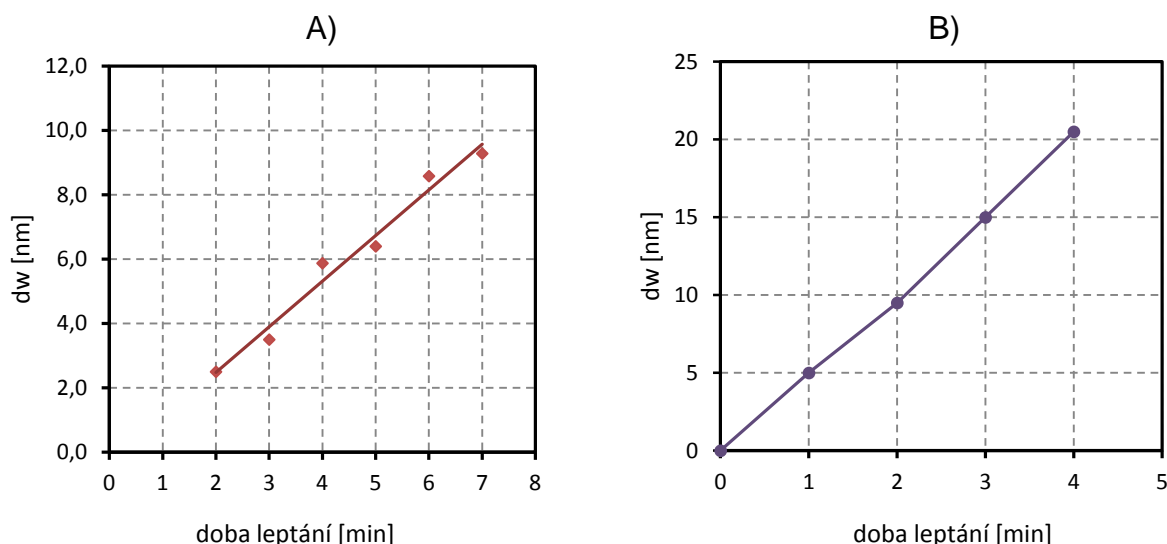


Obr. 4.3.2 Schematické uspořádání plasmatické aparatury TESLA 214VT

Pro přípravu prvního vzorku s rezistem SU-8 (tento fotorezist se dá použít i pro expozice elektronovým svazkem, dále je označen jako rezist) byla zvolena nejméně viskózní verze tohoto rezistu (báze s označením SU-8 2000.5), která obsahuje pouze 14 %_{hm} pevné složky. Tato báze byla zvolena z důvodu možnosti nanesení tenké vrstvy polymeru. Malá tloušťka vrstvy umožňuje dosažení vyššího rozlišení testovacího struktury, a tím i přesnější vyhodnocení procesu leptání pomocí profilometru. Jako nosná podložka byla použita křemíková deska (100) o průměru 3". Ovrstvení vzorku bylo provedeno na odstředivce metodou odstředivého lití. Následovalo sušení vzorku na horké plotně (*hot plate*) při teplotě 90 °C po dobu 1 minuty. Výsledná vrstva měla podle měření na profilometru tloušťku ≈ 340 nm. Testovací struktura pro vyhodnocení leptací rychlosti byla zapsána na elektronovém litografu BS600 (energie elektronů 15 keV) s expoziční dávkou 3 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$. Po expozici byl vzorek opět umístěn na horkou plotnu (při 90 °C po dobu 1 minuty), aby došlo k teplotně iniciované síťovací reakci rezistu v oblastech exponovaných elektronovým svazkem. Vyvolání zapsaného motivu proběhlo na odstředivce ve vývojce mrDEV-600 (*propylen glycol monomethyl ether acetát*, PGMEA) po dobu 30 sekund. Posledním krokem přípravy vzorku bylo tepelné vytvrzení na horké plotně (při teplotě 150 °C po dobu 5 minut).

Druhý vzorek pro vyhodnocení leptací rychlosti byl připraven s tenkou vrstvou rezistu PMMA. Byla zvolena báze PMMA MW 495k A 11, tedy roztok rezistu PMMA s molární hmotností 450k obsahující 11 %_{hm} pevné složky rozpuštěné v *anizolu* (4-methoxybenzen). Nanesení vrstvy PMMA na křemíkovou podložku proběhlo na odstředivce. Vrstva PMMA byla vysušena na horké plotně (při teplotě 150 °C po dobu 9 minut). Výsledná vrstva měla tloušťku ≈ 550 nm. Zápis testovací struktury pro vyhodnocení leptací rychlosti proběhl na elektronovém litografu BS600 s expoziční dávkou 20 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$. Vyvolání zapsaného motivu proběhlo ve vývojce nAAc po dobu 90 sekund při teplotě 23 °C.

Plasmatické leptání obou připravených vzorků proběhlo v aparatuře TESLA 214VT za následujících podmínek: VF příkon $P_{VF} = 100$ W, tlak v pracovní komoře aparatury $p_{prac} = 10^3$ Pa. Leptání za výše zmíněných podmínek probíhalo v několika krocích jako funkce délky leptacího cyklu. Vzhledem k tomu, že rychlost leptání je ovlivněna teplotou vzorku, přičemž během plasmatického procesu dochází k ohřevu jak komory, tak i vzorku samotného, bylo nutné mezi jednotlivými kroky leptání nechat aparaturu i vzorek zchladit na stejnou výchozí teplotu 25 °C. Tak bylo možné alespoň částečně eliminovat variace způsobené ohřevem vzorku. Po každém leptání byl vzorek změřen na kontaktním profilometru (typ *Talystep* značky *Taylor Hobson*). Závislosti leptacích rychlostí pro oba vzorky ukazuje Obr. 4.3.3.



Obr. 4.3.3 Graf závislosti úbytku rezistu při plasmatickém leptání v kyslíku, VF výkon $P_{VF} = 100W$, pracovní tlak $P_{prac} = 10^3 Pa$: a) rezist SU-8 2000.5; b) rezist PMMA 450k A 11 (viz text).

První výsledky leptání vzorku s vrstvou rezistu PMMA ukázaly velmi dobré možnosti řízení výšky reliéfních struktur připravených v této vrstvě. U experimentů s vrstvou rezistu SU-8 (výsledky byly prezentovány v [M5]) byla potvrzena vysoká odolnost tohoto rezistu při leptání v kyslíkové plasmě (viz například [M52]). Tato vysoká odolnost u rezistu SU-8 je způsobena jeho chemickým složením (na bázi epoxidu) a hustotou polymerizační sítě. Dle [52] existuje ještě další možnost leptání vrstev rezistů SU-8 i PMMA vyššími rychlostmi, a to v plasmatu na bázi *tetrafluormethanu* a *kyslíku* (CF_4/O_2), viz [31], [35]. Tento způsob však z důvodu své agresivní povahy při kontaktu s materiálem podložky (křemíku) nebyl testován.

Příklady aplikace technologie plasmatického leptání v praxi:

- Nastavení výšky reliéfu binární reliéfní struktury, například pro tvarovače a děliče laserového svazku na skleněných substrátech – transmisní difrakční optické elementy (DOE).
- Plasmatická úprava povrchů reliéfních struktur před reaktivním iontovým leptáním (RIE) křemíku. Odstraněných zbytků rezistu z otvorů v leptací masce, které mohou zůstat na povrchu křemíku po procesu vyvolání.
- Plasmatické doladění hloubky reliéfu pro fázové difraktivní elementy fourierovského typu (F-PDOE).

4.3.2 Charakterizace binárního plasmatického křemíku přes rezistovou masku

Metoda plasmatického leptání křemíku je založena na reakci za běžných podmínek inertního plynu obsahující fluór (CF_4 , CF_4/O_2 , SF_6 , NF_3) nebo chlór (CCl_4) [32], [37], [38]. Samotný proces leptání je pak založen na reakci některých složek, které jsou generovány v plasmatu. V rámci práce bylo zkoumáno plasmatického leptání křemíku v plynu na bázi CF_4 jehož fyzikální princip je popsán v kapitole 2.4.2.

V případě, že chceme využít metody plasmatického leptání pro prohlubování reliéfních struktur, nebo přenos obrazu zaznamenaného v rezistu do křemíkové podložky je v prvním řadě nutná charakterizace procesu leptání.

Stěžejními parametry při charakterizaci procesu jsou jednak rychlost leptání křemíkové podložky a jednak rychlost úbytku rezistové leptací masky. Z poměru těchto dvou rychlostí se určuje důležitý technologický parametr – selektivita leptání. Dalším důležitým parametrem pro charakterizaci leptání je reprodukovatelnost procesu při použití stejných parametrů (čas, teplota, tlak, průtok plynu). Dalšími parametry jsou anizotropie leptání (směrovost, rychlost leptání v různých směrech), hrubost leptání (drsnot povrchu), a podobně.

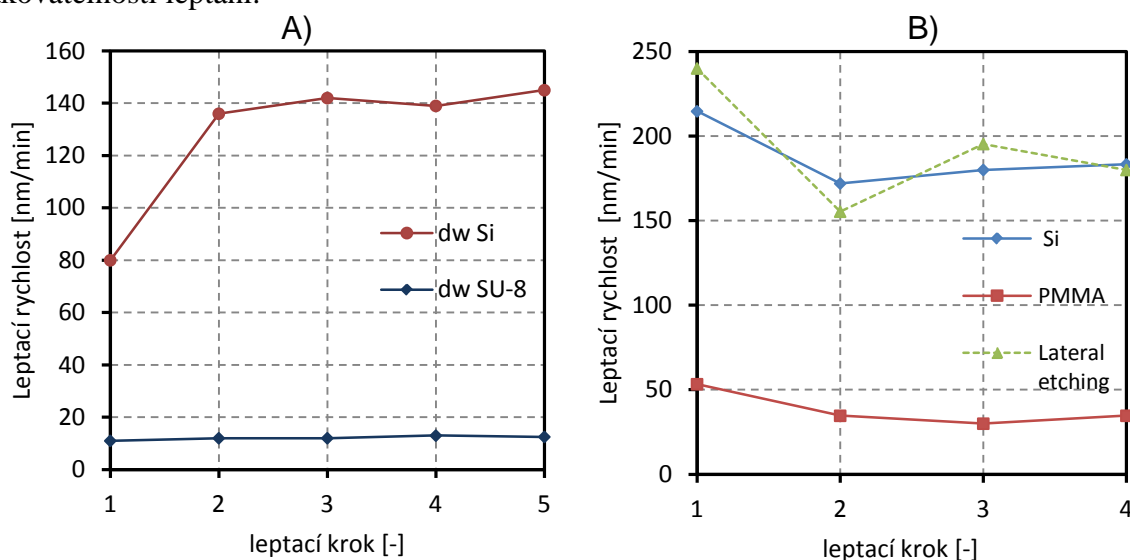


Obr. 4.3.4 Motiv testu pro charakterizaci procesu plasmachemického leptání křemíku zapsaný na litografu BS600 do rezistu PMMA. Snímek motivu testu z optické lupy (vlevo). Snímek jednoho kvadrantu křemíkové desky s litograficky zaznamenaným motivem (vpravo)

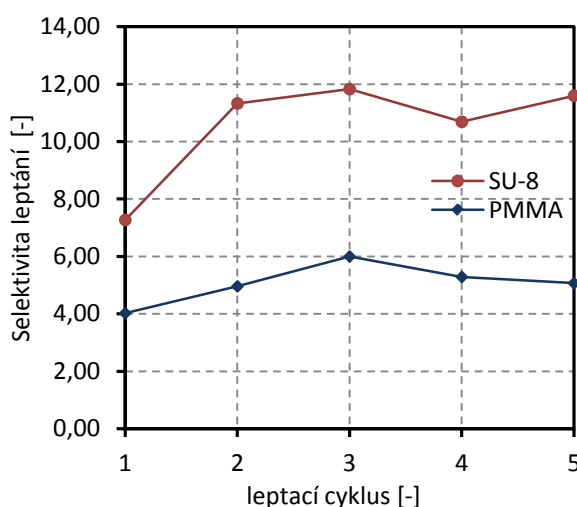
První část prací se zabývala charakterizací leptacího procesu v aparatuře TESLA 214VT popsané na Obr. 4.3.2. Pro tyto účely byl navržen komplexní obrazový test obsahující řadu motivů binárních i víceúrovňových struktur mřížkového i plošného typu, viz Obr. 4.3.4. Volba testovacích motivů byla provedena s ohledem na možnost vyhodnocení výsledků leptací reakce na dostupných zařízeních — optický odměřovací mikroskop, konfokální mikroskop (CLSM), mikroskop atomárních sil (AFM), profilometr. Zápis motivu testu byl realizován pomocí elektronového litografu BS600 na křemíkových podložkách Si(100) s vrstvou rezistu PMMA resp. SU-8. Příprava vzorků byla provedena způsobem pospaným výše v kapitole 4.3.1. Během experimentu byly hodnoceny vlastnosti obou zmíněných vrstev plnících funkci masky při leptání křemíkové podložky [M5]. Jako pracovní plyn byla použita směs CF_4/O_2 s poměrem 84 : 16. VF výkon $P_{VF} = 200 \text{ W}$, pracovní tlak p_{prac} v komoře se pohyboval kolem hodnoty 600 Pa a průtok plynu Q_p byl nastaven na manuálním průtokoměru (rotametri) na hodnotu 20 sccm. Jednotka sccm (z anglického *standard cubic centimeters per minute*) vyjadřuje jednotku měření toku v cm^3/min , při standardní teplotě a tlaku. Doba leptacího cyklu byla nastavena na 90 sekund.

Charakterizace leptacího procesu byla provedena tak, že po každém kroku leptání byla u obou vzorků změřena tloušťka reziduální vrstvy rezistu a tloušťka křemíku odstraněného během daného kroku leptání. Leptání a měření vzorků se opakovalo pětkrát u vzorku s SU-8

a čtyřikrát u vzorku s PMMA. U vzorku s PMMA byl navíc vyhodnocován stupeň anizotropie leptání, a to měřením úbytku křemíku v laterálním směru měřeném na CLSM a na AFM. Důvodem opakovaného leptání v krocích za konstantních podmínek byla snaha o kvantifikaci opakovatelnosti leptání.



Obr. 4.3.5 Charakterizace plasmatického leptání křemíku přes rezistovou masku tvořenou A) SU-8 ; B) PMMA

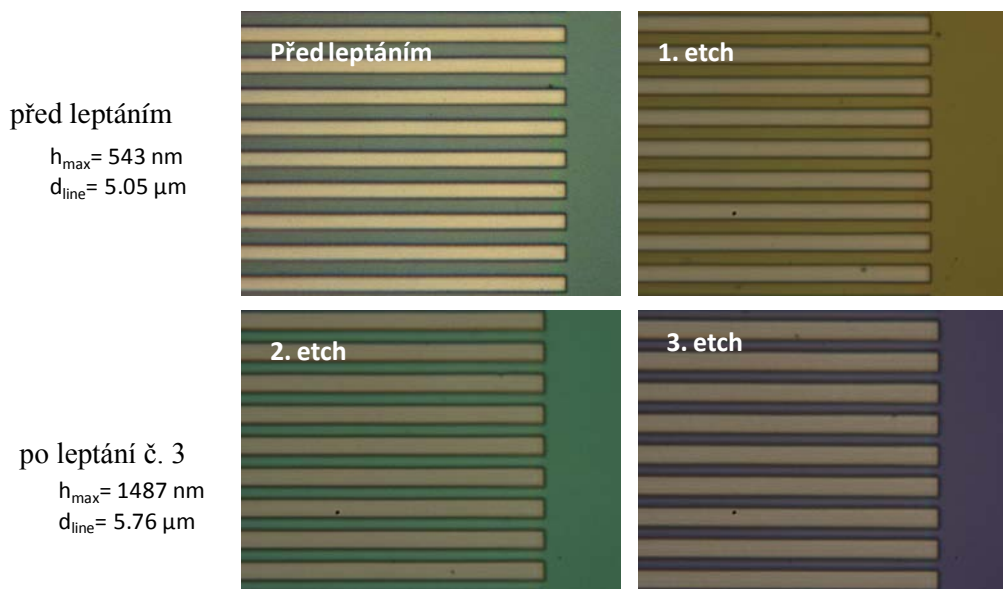


Obr. 4.3.6 Srovnání selektivity leptání při plasmatickém leptání křemíku v CF_4/O_2 v aparatuře TESLA 214VT, při použití leptací masky z materiálu PMMA resp. SU-8

Vlastnosti procesu plasmatického leptání křemíku v aparatuře TESLA 214VT při použití směsi CF_4/O_2 — prezentované v pracích [M5], [M52] — popisují grafické závislosti na Obr. 4.3.5 a Obr. 4.3.6. Selektivita leptání se v případě rezistu PMMA pohybuje kolem hodnoty 5; v případě rezistu SU-8 je selektivita leptání více jak dvojnásobná. Leptací rychlost křemíku pro zvolený recept se pohybuje kolem hodnoty 180 nm/min pro masku z PMMA respektive 140 nm/min pro masku z SU-8.

Rozdíl v leptací rychlosti si lze v tomto případě vysvětlit rozdílnou úrovní dopace u obou podložek, které byly pro daný experiment použity. Nižší leptací rychlost křemíku v prvním

kroku leptání u vzorku s vrstvou SU-8 lze vysvětlit přítomností reziduí rezistu, která zůstala v otvorech leptací masky po vyvolání. Tato rezidua rezistu po určitou dobu brzdila proces leptání křemíku. Při porovnání jednotlivých leptacích cyklů lze konstatovat, že reprodukovatelnost procesu leptání je na dobré úrovni. Z charakterizace směrovosti leptání (vyhodnocené na vzorku s PMMA, viz Obr. 4.3.7) vyplývá, že proces leptání je v použitém typu reaktoru stejně rychlý ve všech leptacích směrech; leptání má tedy izotropní charakter.



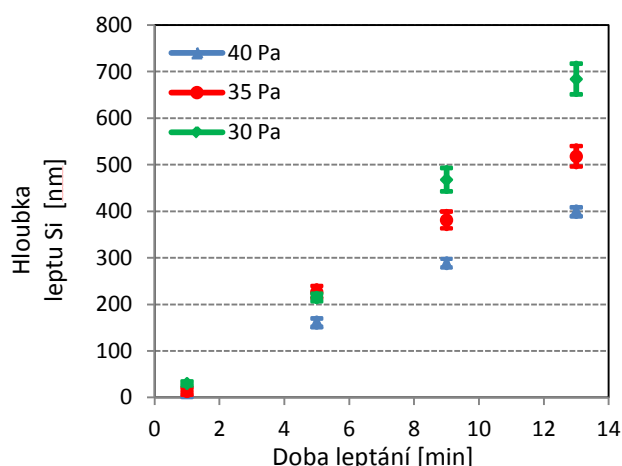
Obr. 4.3.7 Srovnání mřížky s periodou $\Lambda = 10 \mu\text{m}$ z hlediska laterálního rozšiřování otvorů po jednotlivých krocích leptání. Srovnání hodnot celkové hloubky a šířky leptaných otvorů přes PMMA před a po leptání (vlevo)

Druhá část prací, publikovaná v [M45] se zabývala charakterizací procesu leptání v aparatuře Diener Nano se stejnou leptací směsí CF_4/O_2 . Stejně jako u aparatury TESLA 214VT se jedná o plasmatický reaktor s válcovou komorou. Zde však podobnost končí. Zařízení Diener Nano využívá pro buzení plasmatu kapacitní princip a budící frekvenci 40 kHz. Vysokofrekvenční (VF) výkon lze plynule měnit v rozsahu 0–1000 W. Systém pracuje při tlaku 1 – 100 Pa. Toto zařízení má dva plynové kanály umožňující práci s jedním ze dvou plynů nebo oběma plyny současně. Průtok plynu Q do komory lze řídit přes rotametry v rozsahu 0–100 sccm.

V rámci experimentu byla charakterizována závislosti leptací rychlosti na pracovním tlaku v komoře a závislost leptací rychlosti na VF výkonu. Pro účely měření byly připraveny křemíkové vzorky s vrstvou PMMA MW = 950k, která současně sloužila jako leptací maska. Po vyvolání motivu leptací masky byl vzorek vystaven působení kyslíkového plasmatu po dobu 6. minut, aby došlo k dokonalému odstranění reziduí rezistu v otvorech masky.

V části experimentu pro charakterizaci vlivu tlaku v komoře na leptací rychlosti byly testovány tři různé pracovní tlaky 30; 35 a 40 Pa při konstantním VF výkonu 500 W. Leptání probíhalo ve čtyřech krocích s délkou cyklu 4 minuty. Po každém kroku byla změřena hloubka leptu na AFM. Aby byly zachovány pokud možno stejné podmínky leptání, byly vzorky uloženy do stejné pozice v komoře (1/3 výšky leptací komory). Výsledky experimentu jsou popsány na Obr. 4.3.8 a v Tab. 4.3.1. Jak je patrné, se zvyšujícím se tlakem p_{prac} dochází

ke snižování leptací rychlosti obou materiálů (R_{Si} i R_{PMMA}). Příčinou je snížení reaktivity plazmy; při vyšším pracovním tlaku je vyšší pravděpodobnosti srážek a rekombinace fluorových radikálů.

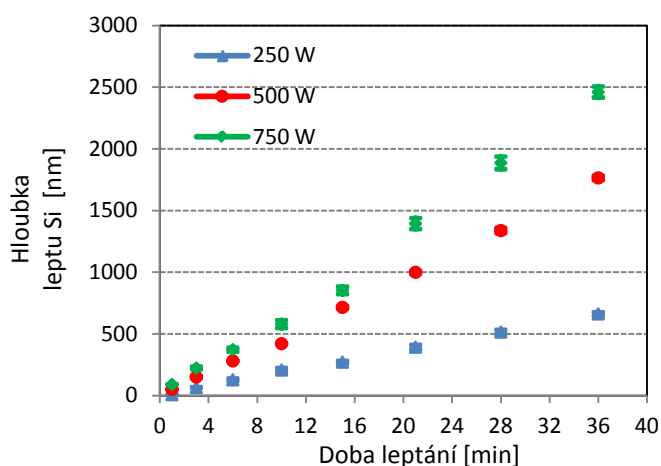


Obr. 4.3.8 Graf závislosti hloubky leptů v křemíku pro jednotlivé kroky leptání v plasmatické aparatuře Diener Nano; pro konstantní VF výkon 500 W a tři různé pracovní tlaky.

Tab. 4.3.1 Tabulka vypočtených hodnot rychlosti a selektivity leptání ve směsi CF_4/O_2 pro různé nastavení pracovního tlaku a pro konstantní VF výkon 500

p_{proc} [Pa]	Q_p [sccm]	R_{Si} [nm/min]	R_{PMMA} [nm/min]	Selektivita [-]
40	34	30,7	1,9	16:1
35	26	39,9	2,9	14:1
30	20	52,5	3,6	15:1

V části experimentu pro charakterizaci závislosti rychlosti leptání na VF výkonu byly testovány tři výkony 250; 500 a 750 W. Leptání probíhalo v osmi jednominutových krocích při konstantním pracovním tlaku 30 Pa. Mezi kroky leptání byla vyhodnocována hloubka leptů na AFM. Výsledky experimentu jsou popsány na Obr. 4.3.9 a v Tab. 4.3.2. Ze závislostí vyplývá, že se zvyšujícím výkonem se zvyšuje i leptací rychlost, což odpovídá předpokladu. Dalším zajímavým zjištěním je malá nelinearita růstu leptací rychlosti v závislosti na délce leptacího cyklu, která byla v případě TESLA 214VT poměrně vysoká. Vysvětlujeme si ji nízkým tepelným vlivem plasmatu na ohřev vzorku, který je pro zdroje s nižší budící frekvencí (40kHz) plazmy typický.



Obr. 4.3.9 Graf závislosti hloubky leptů v křemíku pro jednotlivé kroky leptání v plasmatické aparatuře Diener Nano; pro konstantní tlak $p = 30$ Pa a průtok plynu $Q = 20$ sccm a tři různé VF výkony.

Tab. 4.3.2 Tabulka vypočtených hodnot rychlostí a selektivity leptání ve směsi CF_4/O_2 pro různé pracovní VF výkony a konstantní pracovní tlak v komoře.

P_{VF} [W]	R_{Si} [nm/min]	R_{PMMA} [nm/min]	Selektivita [-]
250	18,4	1,4	13:1
500	46,7	2,6	16:1
750	68,2	3,3	21:1

4.3.3 Technologie prohlubování víceúrovňových reliéfních struktur plasmatickým leptáním

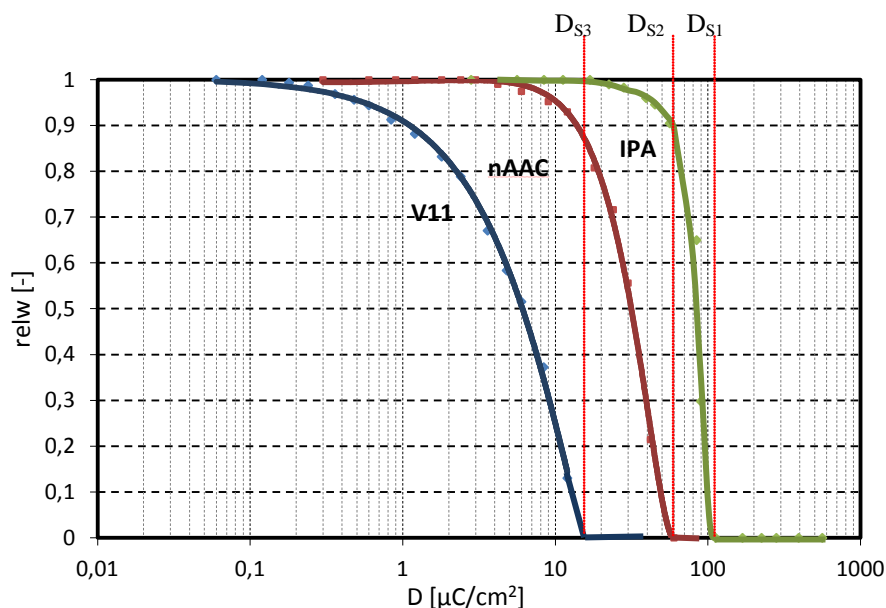
Zápis hlubokých ($<1\text{ }\mu\text{m}$) víceúrovňových reliéfních mikrostruktur pomocí EBL má jistá omezení, související primárně s rozptylovými jevy probíhajícími při expozici rezistu (viz 2.3.2). Jako jedno z možných řešení tohoto problému byla zvažována možnost zvýšení hloubky tohoto typu struktur kombinací EBL s technologií plasmatického leptání. Kombinace litografie a leptání je běžná v procesu výroby IO, ovšem v binární podobě [1], [3], [4]. Pro přenos obrazu víceúrovňových (3D) struktur leptáním do podložky je nutné připravit vhodnou víceúrovňovou masku ve vhodném materiálu. Tato maska by se mezi leptacími kroky postupně otevírala na povrch podložky (kvazibinární leptání). Podobně lze využít přípravu leptací masky binární litografie v několika krocích, kdy každá další binární maska otevírá postupně jinou část povrchu. Tato metoda je však náročná z hlediska soukrytu jednotlivých expozic binárních masek, a pro větší množství opakovaných expozic se stává málo efektivní. Další metoda je založena na využití selektivity leptání mezi materiálem podložky a masky. Leptací maska, v tomto případě není binární ale víceúrovňová, je připravená šedou litografií (2.1). V průběhu leptání podložky dochází k současnému leptání povrchu masky, která tak postupně obnažuje povrch podložky. Tímto principem je umožněn přenos tvaru připraveného v masce do podložky, a to v poměru daného selektivitou leptání mezi materiálem podložky a masky.

4.3.4 Leptání přes postupně vyvolávanou masku

Pro experiment s postupně otevíranou binárním maskou bylo využito principu různých rozpouštěcích rychlostí a prahových hodnot citlivosti pro různé systémy vývojek a rezistu. Pro experiment byl jako záznamový materiál zvolen rezist PMMA, a to s ohledem na známé chování tohoto rezistu během leptání křemíkové podložky prezentované dříve, viz 4.3.2. Druhým důvodem pro volbu rezistu PMMA je jeho velké rozšíření v technologii EBL a široká škála vhodných dostupných vývojek.

V prvním kroku byly změřeny křivky citlivosti pro tři typy vývojek na bázi *isopropylalkoholu* (IPA), nAAc a *ethylalkohol-acetonu* (V11). Expoziční dávky pro jednotlivé expozice testu citlivosti na ELG BS600 byly $100\text{ }\mu\text{C}/\text{cm}^2$ pro vývojku IPA95, $40\text{ }\mu\text{C}/\text{cm}^2$ pro vývojku nAAc a $7\text{ }\mu\text{C}/\text{cm}^2$ pro vývojku V11. Odpovídající křivky citlivosti pro tyto tři vývojky jsou prezentovány na Obr. 4.3.10.

V dalším kroku byly z křivek citlivosti odečteny hodnoty čistících dávek pro všechny tři typy vývojek $D_{S1} = 100\text{ }\mu\text{C}/\text{cm}^2$, $D_{S2} = 50\text{ }\mu\text{C}/\text{cm}^2$ a $D_{S3} = 14\text{ }\mu\text{C}/\text{cm}^2$. Tyto expoziční dávky mohou být následně použity při zápisu motivu jednotlivých stupňů 4úrovňové struktury na ELG BS600.



Obr. 4.3.10 Křivky citlivosti PMMA MW 950k pro tři vývojky:
 IPA : H₂O (95 : 5), nAAc a Ethylalkohol : Aceton (1 : 1).

Při datovém návrhu expozice leptací masky na ELG je nutné počítat s ovlivněním jednotlivých exponovaných ploch, kdy oblast s velmi vysokou dávkou (pro vývojku IPA) může (vlivem EBPE, a to zvláště u struktur malých rozměrů) značně ovlivnit výslednou dávku i v ostatních oblastech (nAAc, V11). Může tak při vyvolání docházet k rozpuštění širší oblasti, než je požadovaná oblast, zvláště pak u vývojek složených ze silnějších rozpouštědel (např. V11). Částečné odstranění tohoto problému lze řešit změnou poměru exponované plochy pro vyšší expoziční dávku (např. u binární mřížky by toho bylo dosaženo zmenšením šířky čáry).

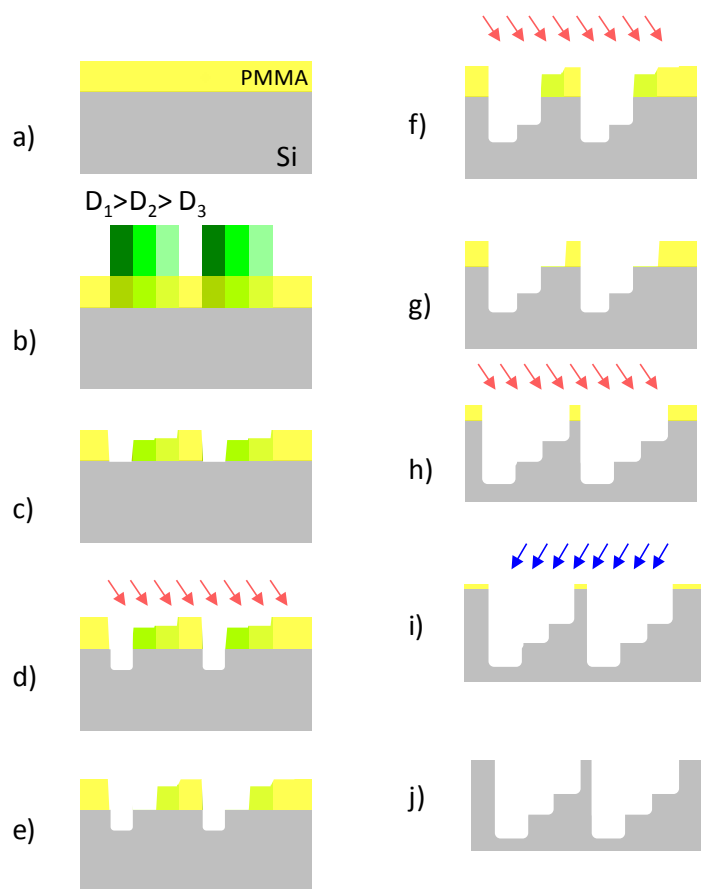
Při přípravě samotného vzorku s kvazibinární leptací maskou je třeba dbát na to, že tloušťka nanesené vrstvy rezistu musí být natolik mohutná, aby nedošlo k úplnému odstranění vrstvy rezistu při jednotlivých krocích procesu leptání. Tedy s ohledem na konečnou hloubku leptané struktury v křemíku a s ohledem na rychlost leptání masky samotné. Současně však musí být tloušťka rezistu natolik malá, aby bylo možno dosáhnout požadovaného rozlišení zápisu mikrostruktur zadaných rozměrů. Pro přípravu leptaných struktur s hloubkou 1 až 2 μm je ideální tloušťka leptací masky z PMMA $h \approx 300-600$ nm.

Dalším důležitým požadavkem je zajištění dobré adheze rezistu k podložce z důvodu opakovaného vystavování rozpouštědlům ve vývojkách. Toho lze docílit aplikací promotoru adheze např. *hexa methyl disilazan* (HMDS), nebo plasmatickým leptáním v O₂, nebo žíháním (150 °C, 5-10 minut) křemíkové podložky před depozicí vrstvy PMMA z důvodu desorpce vody. Důležité je mezi jednotlivými kroky vyvolávání a leptání aplikovat sušení vzorku od zbytků rozpouštědla (horkovzdušná pec, 60-70 °C, 10. minut). Před plasmatickým leptáním křemíku je dobré, aby leptání předcházel krátký cyklus plasmatického leptání na bázi kyslíku pro odstranění reziduí rezistu (při současném odstranění 10 až 15 nm rezistu), která mohla zůstat v otvorech leptací masky po procesu vyvolávání. Rezidua rezistu by jinak

mohla způsobit blokování leptací reakce po určitou dobu při procesu leptání křemíku, a způsobit tak nelineární přírůstky hloubky leptaných struktur.

Proces plasmatického leptání křemíku je nastaven tak, aby přírůstky leptání v jednotlivých krocích byly vždy jen zlomkem cílové hloubky leptané struktury. V případě 4úrovňové struktury to znamená, že během každého kroku leptání bude leptána jen 1/3 cílové hloubky, protože při postupném otevírání leptací masky budou leptány vždy plochy, jež byly leptány i v přecházejícím kroku.

Hlavní body technologického postupu výroby leptané 4 úrovňové mikrostruktury metodou postupně otvírané binární masky je schematicky znázorněny na Obr. 4.3.11.



Obr. 4.3.11 Schematické znázornění technologického postupu při tvorbě postupně leptané 4úrovňové struktury v křemíku přes postupně vyvolávanou PMMA masku.

Jednotlivé kroky postupu při leptání křemíku s postupně vyvolávanou rezistovou maskou následují:

- nanesení PMMA na křemíkovou podložku
- expozice rezistu EBL
- první vyvolání vzorku (vývojkou IPA95)
- první krok plasmatického leptání v CF_4/O_2
- druhé vyvolání vzorku (vývojkou nAAc)
- druhý krok plasmatického leptání v CF_4/O_2

- g) třetí vyvolání vzorku (vývojkou V11)
- h) třetí krok plasmatického leptání v CF_4/O_2
- i) plasmatické leptání zbytku masky PMMA v O_2
- j) výsledná lepaná struktura

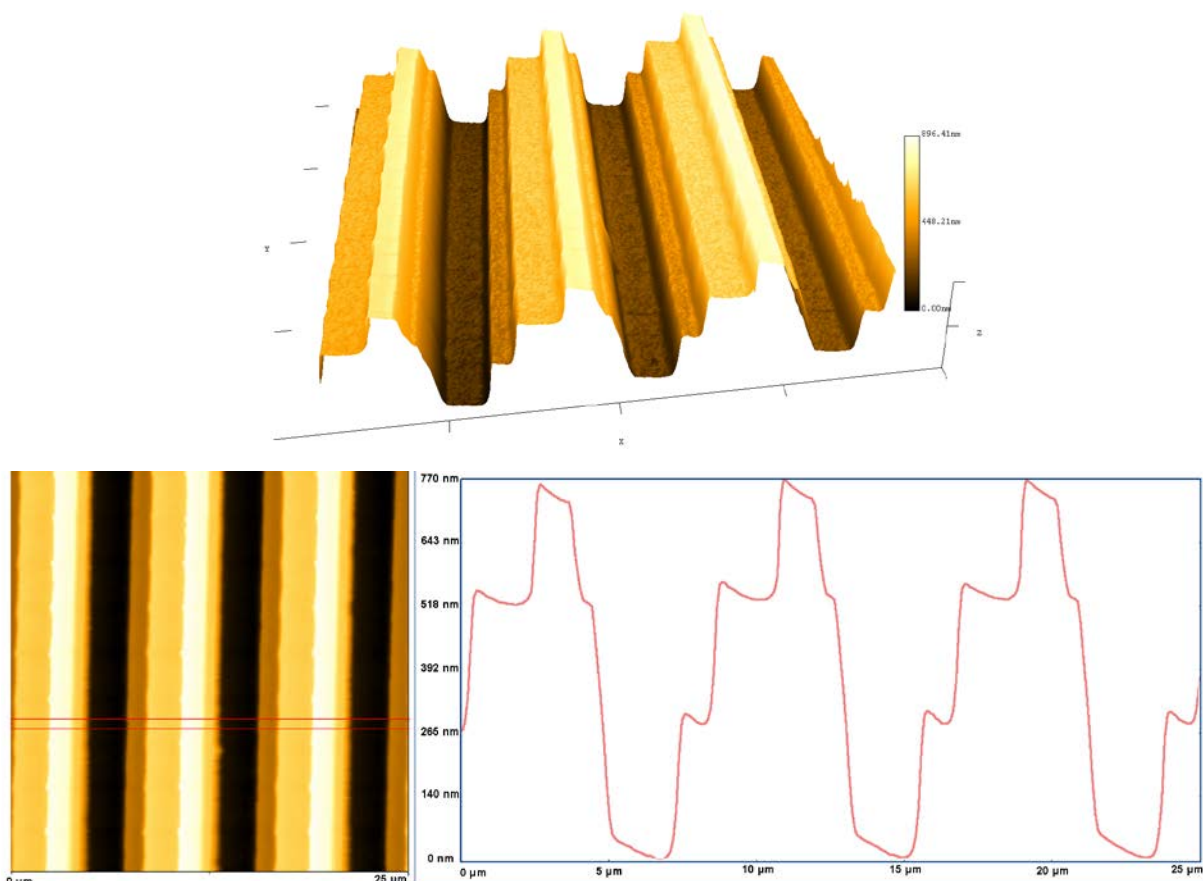
Navržený výrobní postup s postupně vyvolávanou leptací maskou byl experimentálně ověřen na křemíkovém vzorku (100) s vrstvou PMMA MW = 950k ($w = 300$ nm). Jako testovací struktura byla zvolena 4úrovňová mřížka s periodou 8 μm . Zápis motivu masky proběhl na ELG BS600 s expozičními dávkami pro jednotlivé stupně rovné $D_1 = 150 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, $D_2 = 60 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ a $D_3 = 20 \mu\text{C}/\text{cm}^2$. Vyvolávání a postupné otevírání leptací masky pro každou z použitých vývojek probíhalo postupně za současné kontroly motivu masky v motivu mřížky i v motivu testu citlivosti na optickém mikroskopu a na AFM. Pro čištění povrchu po každém kroku vyvolávání bylo aplikováno plasmatické čištění v aparatuře TESLA 214VT v kyslíku při VF výkonu 100 W pracovním tlaku 10^3 Pa po dobu 2 minut.

Leptání křemíkové podložky probíhalo v aparatuře TESLA 214VT popsaná v kapitole 4.3. Jako leptací plyn byla použita směs CF_4/O_2 (84 : 16). Během leptání byl na aparatuře nastaven VF příkon $P_{VF} = 100$ W, pracovní tlak v komoře se pohyboval kolem $p_{\text{prac}} = 10^3$ Pa, průtok pracovního plynu do komory $Q_p \approx 25$ sccm. Délka leptací cyklu byla zvolena pro každý krok stejná tj. 1 minutu bez aplikace plasmy (pro propláchnutí komory leptacím plynem) a 2 minuty s aplikací plasmy ($P_{VF} = 100$ W).

Výsledný vzorek, viz Obr. 4.3.12, obsahoval mřížkovou mikrostrukturu s hloubkou ≈ 750 nm. Krok mezi jednotlivými schodky byl přibližně 250 nm. Výše prezentovanou metodou se tedy podařilo vyleptat reliéf 2,5 \times hlubší, než byla tloušťka vrstvy PMMA. V zásadě by však mělo být možné, při použití stejné aparatury, vyleptat strukturu až 4násobně hlubší.

Jistým nedostatkem této metody může být obtížnější tvorba víceúrovňových struktur s větším množstvím schodků. Limit technologie je i v šířce jednoho stupně masky, který je při zápisu na BS600 přibližně na úrovni 1 μm .

Možnost úpravy stávající metody spočívá v aplikaci jedné vývojky při postupném otvírání masky, kdy by se využívalo principu posunu polohy čistící dávky v závislosti době vyvolávání. Pro tento model je vhodné využít vývojku se středně vysokým kontrastem 2 až 3 například *nAAc* nebo *MBIK*.



Obr. 4.3.12 AFM snímek 4úrovňové mřížkové mikrostruktury s periodou čar 8 μm leptané v Si(100) přes postupně vyvolávanou leptací masku.

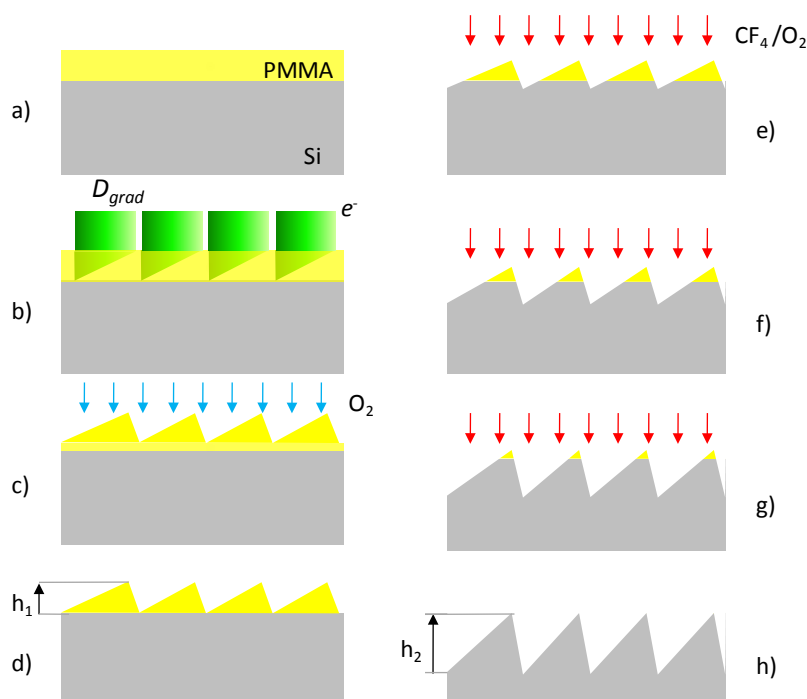
4.3.5 Leptání přes postupně mizící masku

Metoda leptání s postupně mizící maskou byla vyvíjena v návaznosti na metodu aplikovanou v předchozí kapitole 4.3.5 s cílem odstranění jejích nedostatků v případně výroby mikrostruktury s větším množstvím leptacích kroků. Výrobní proces se totiž stává pro větší počet schodkových úrovní víceúrovňových struktur neúnosným. Princip metody je schematicky popsán na Obr. 4.3.13.

Během leptání dochází ke kontinuálnímu úbytku materiálu leptané vrstvy, a zároveň k mírnému úbytku materiálu rezistu v masce. Tloušťku vrstvy pro přípravu masky je třeba volit tak, aby došlo v průběhu leptání křemíku k jejímu bezzbytkovému odstranění. Pro vyleptání reliéfu do křemíku o hloubce 1 až 2 μm by měla být dostatečná tloušťka vrstvy v oblasti mezi 300-900 nm.

Reliéf zaznamenaný leptáním vykazuje dobrou hloubkovou homogenitu v ploše pro případ prvků, jejichž laterálních rozměry jsou $\geq 1 \mu\text{m}$. Problematické může být pouze leptání přes masku s prvky příliš malých rozměrů ($< 1 \mu\text{m}$). V tomto případě může docházet k horšímu přístupu chemických reaktantů z plasmu k leptanému povrchu. Značný vliv na výsledek má i typ plasmatické aparatury. V případě barelových typů reaktorů, jako je například zařízení TESLA 214VT, je nutné počítat s mírným rozšířením leptaných struktur v důsledku isotropního charakteru generovaného plasmatu. Pro vysoké hloubky leptání tento faktor hraje

významnou roli, a to zvláště pro velmi jemné mikrostruktury. V případě použití dané metody v plasmatické aparatuře s elektrodou RIE však tento způsob leptání může být velice efektivní vzhledem k anizotropnímu charakteru leptání u těchto typů zařízení.



Obr. 4.3.13 Schematické znázornění technologického postupu při tvorbě víceúrovňové struktury metodou leptání přes mizící masku.

Jednotlivé kroky postupu při leptání křemíku s postupně mizící maskou:

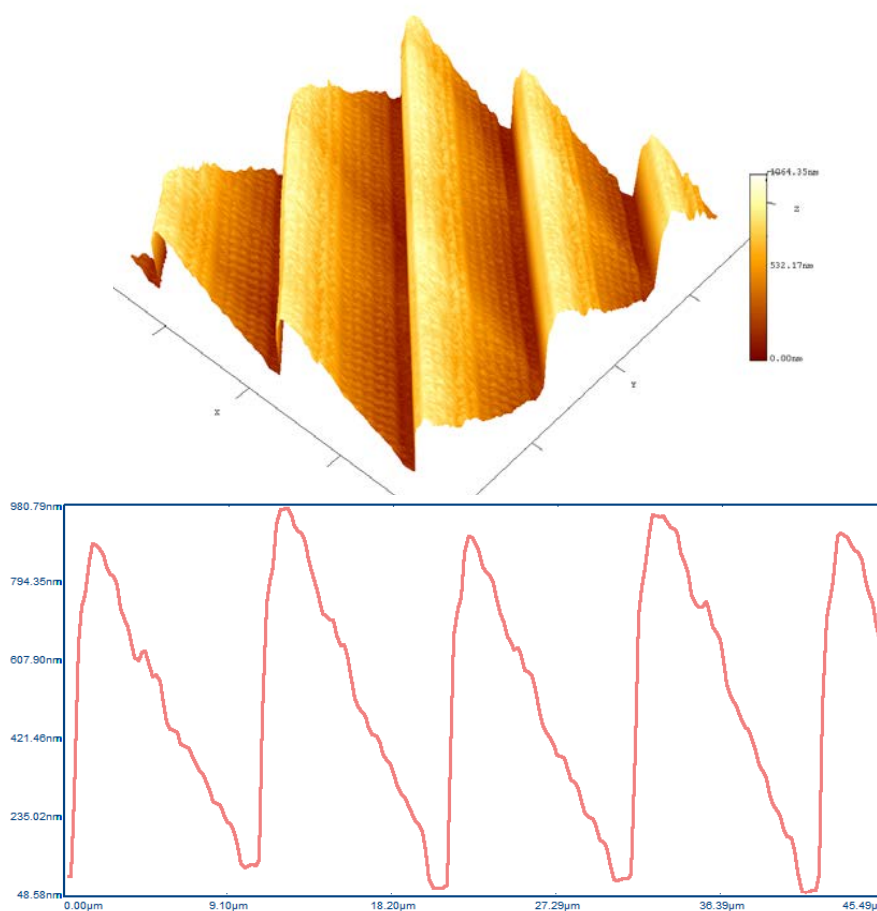
- nanesení PMMA na křemíkovou podložku.
- expozice rezistu šedou EBL.
- plasmatické doladění výšky rezistové masky v O_2 .
- reliéfní maska z PMMA s víceúrovňovým motivem a výškou h_1 , před procesem leptání křemíku.
- g) plasmatické leptání křemíku za současného úbytku leptací masky.
- h) výsledná struktura vyleptaná do křemíkové podložky s hloubkou reliéfu h_2 .

Pro experimentální potvrzení metody leptání byl připraven vzorek křemíku s leptací maskou z materiálu PMMA MW 950k ($w = 850$ nm). Volba rezistu a vývojky byla taková, aby výsledný kontrast v křivce citlivosti byl malý. Tím bylo získáno poměrně široké pracovní okno pro nastavení expozičních dávek, bez nutnosti silné kompenzace tvaru a sklonu křivky. Záznam masky byl proveden na ELG BS600 s expoziční dávkou 3 resp. 7 $\mu C/cm^2$. Motivem masky byla víceúrovňová mikrostruktura zaznamenaná se submikronovým rozlišením zápisu. Pro datovou přípravu víceúrovňové mřížky se 4 až 32 úrovněmi byl zvolen algoritmus s vyhlazováním v jednom a ve dvou směrech představený v kapitole 4.1.3 a 4.1.4.

Při vyvolávání bylo postupováno tak, aby schodek exponovaný nejvyšší dávkou byl vyvolán téměř na povrch křemíkové podložky (bez zbytků rezistu). Pro vyvolávání vzorku byla použita vývojka V11. Vyvolávání probíhalo po dobu 120 s v prvním kroku a po dobu

160 s v kroku druhém. Způsob vyvolávání masky klade značné nároky na přesnost řízení procesu vyvolávání, mezi jednotlivými kroky tak byla nutná inspekce reliéfu struktur na AFM. Proces leptání křemíku proběhl v plasmatickém reaktoru TESLA 214VT ve směsi CF_4/O_2 při VF příkonu $P_{VF} = 100 \text{ W}$, $p_{prac} = 10^3 \text{ Pa}$ a průtok pracovního plynu do komory $Q_p \approx 20 \text{ sccm}$. Leptání bylo rozděleno do dvou kroků s délkou cyklu 5. a 10. minut. Mezi leptacími kroky probíhalo vyhodnocování zapsaného reliéfu na AFM.

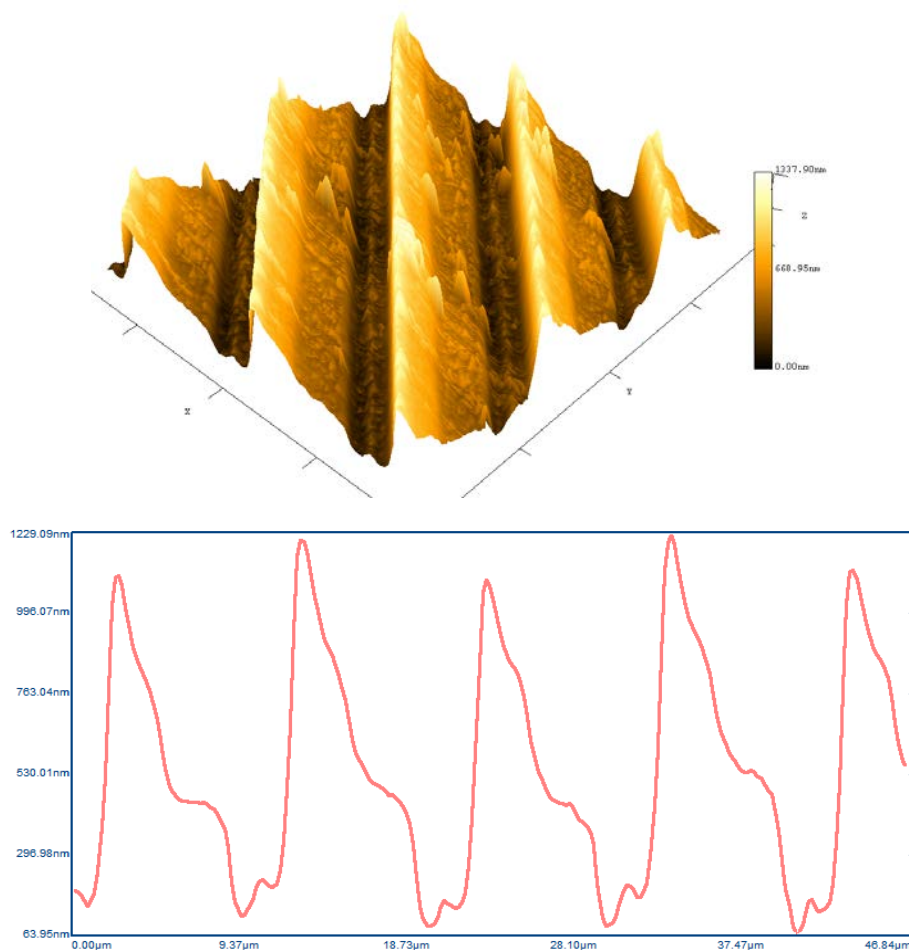
Náhled na motiv masky zaznamenané v rezistu a profil přenesený do křemíku leptání přes tuto masku ukazují Obr. 4.3.14 a Obr. 4.3.15. Výška reliéfní masky připravené v rezistu po druhém kroku vyvolání dosahovala výšky $\approx 800 \text{ nm}$. Výška reliéfu přeneseného leptáním do křemíkové podložky dosahovala úrovně až 1300 nm . Tomu odpovídá přenos obrazu se selektivitou $1,6 : 1$ (Si : PMMA)



Obr. 4.3.14 Motiv leptací masky v PMMA exponovaný algoritmem s vyhlazováním v jednom směru, 16 úrovní, snímek z AFM.

Důvodem, proč nebylo dosaženo při experimentu lepšího poměru přenosu obrazu, je izotropní charakter leptání, ke kterému dochází v případě zvoleného typu aparatury. Rezistová maska tak mizí rychleji v porovnání s binárním leptáním charakterizovaným dříve. Dalším důvodem je nevhodně zvolená délka posledního leptacího kroku, kdy pravděpodobně docházelo po určitou dobu k celoplošnému leptání vzorku již bez masky, a tím k zaoblení ostrých hran mřížky a snížení výšky profilu. Izotropní charakter leptání má na druhou stranu

pozitivní vliv na výslednou drsnost leptaných struktur. Pomáhá vyhlazovat nerovnosti (schodky), které jsou jinak dobře patrné na rezistové masce. V rámci leptaného reliéfu po nich nezbyly žádné stopy.



Obr. 4.3.15 Motiv přenesený plasmatickým leptáním do křemíku při výkonu $P_{VF} = 200 \text{ W}$, době leptání $5 + 10 \text{ minut}$, $Q_p = 20 \text{ sccm CF}_4/\text{O}_2$ (obráčeno zleva doprava).

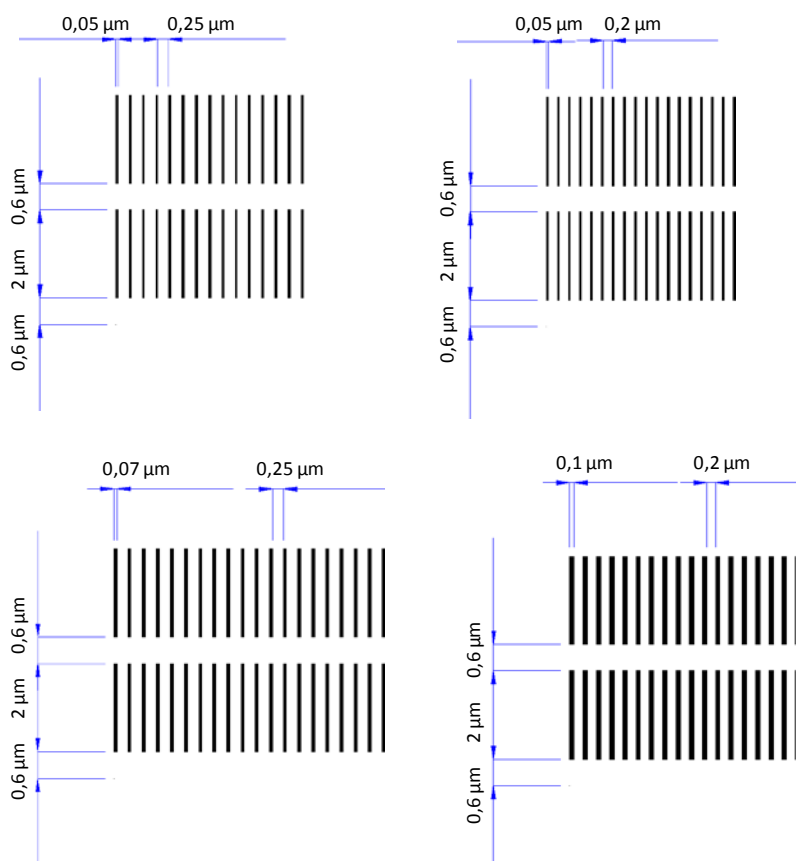
Při závěrečném hodnocení metody lze říci, že i přes problémy, způsobené poměrně komplikovanou metodu tvorby leptací masky, se podařilo ověřit princip přenosu obrazových informací z "šedé" masky do křemíku metodou plasmatického leptání s postupně mizící maskou. Bylo jištěno, že metoda je zvláště citlivá na stupeň komplexnosti a různorodost obrazových vzorů. Zvláště v případě, že maska obsahuje větší množství prvků různých rozměrů, je nutné předem odladit proces vyvolávání pro každý z nich. V opačném případě může docházce v průběhu leptání k nesynchronnímu počátku a konci leptání jednotlivých částí obrazu a tím k nehomogenní výšce jednotlivých mikroreliéfů. Výhodné může být zahrnutí PEC obrazových podkladů před zápisem masky na EBL.

4.4 Výroba mikro a nano strukturovaných membrán

Studium výroby mřížkově mikro a nano strukturovaných membrán vychází ze současného trendu a aplikačního potenciálu těchto prvků, jako jsou například děliče svazků pro rentgenovou spektroskopii [42], metrologické standardy (TEM, SEM) [43], aplikace zpracování UV a DUV světla [44], [45], mikrofluidní MEMS pro mikrosensory [46], mřížky pro zpracování elektronových svazků v elektronové optice [47] a mnoho dalších.

4.4.1 Výchozí technologický postup

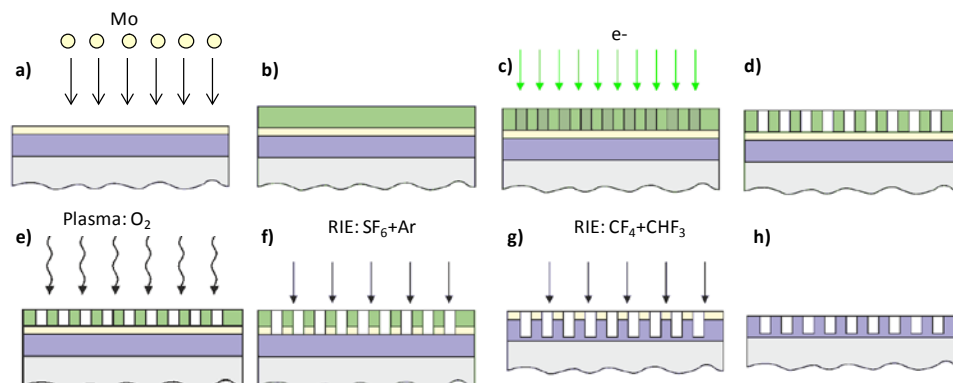
Cílem této části bylo vytvoření čipů s nano strukturovanou nitridovou membránou (SIN), jejíž aplikace spadá do oblasti elektronové optiky, konkrétně pro studium koherenčních vlastností elektronových svazků v SEM [M49], [M51]. Tato aplikace vyžaduje struktury na povrchu tenké membrány s průchozími štěrbinami o velikosti 50 až 100 nm. Soustava těchto štěrbin pak tvoří základ pro difrakční mřížku. Parametrické zadání pro čtveřici motivů takové struktury je na Obr. 4.4.1.



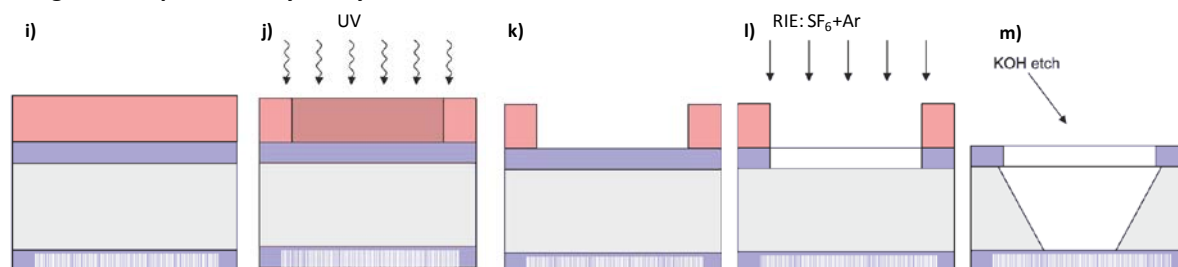
Obr. 4.4.1 Čtveřice motivů difrakčních mřížek pro strukturování nitridové membrány.

Prvním krokem před vlastní realizací byla studie proveditelnosti, v rámci které byl proveden i záznam definované mřížkové struktury na elektronovém litografu. Následovalo stanovení vhodných technologických postupů, volba zařízení a stanovení kritických kroků technologie, u kterých se předpokládala potřeba optimalizace jejich procesu. Výsledkem studie je schematické znázornění hlavních kroků procesu výroby, viz Obr. 4.4.2.

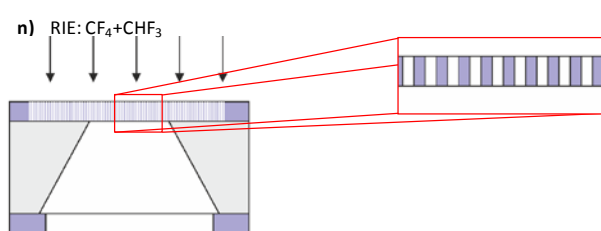
Litografie z horní strany desky



Litografie ze spodní strany desky



Finalizace



Obr. 4.4.2 Hlavní procesní kroky při výrobě čipu s nano strukturovanou nitridovou membránou.

Technologický postup pro realizaci nano strukturované nitridové membrány sestává z následujících kroků (náročný proces pravděpodobně vyžadující optimalizaci označen *, kritický proces s nezbytnou optimalizací označen **):

Litografie z horní strany desky:

- depozice molybdenu
- depozice rezistu PMMA
- * expozice motivu mřížky EBL (EBPG5000+ES Vistec)
- * proces vyvolání v IPA : H₂O
- plasmatické leptání PMMA v O₂
- * přenesení motivu mřížky z PMMA do Mo vrstvy metodou RIE (viz Tab. 4.4.1)
- ** přenesení motivu mřížky z Mo do Si₃N₄ vrstvy metodou RIE (viz Tab. 4.4.2)
- mokrý leptání vrstvy Mo (H₃PO₄ : HNO₃ : H₂O)

Litografie ze spodní strany desky:

- depozice fotorezistu ze zadní strany desky
- expozice motivu leptací masky na UV masce do fotorezistu

- k) proces vyvolání v alkalické vývojce (303A)
- l) přenesení motivu leptací masky z fotorezistu do Si_3N_4 vrstvy metodou RIE
- m) * mokré anizotropní leptání křemíku v lázni KOH

Finalizace:

- n) ** nemaskované leptání Si_3N_4 ze strany mřížkového motivu metodou RIE
(viz Tab. 4.4.3)

Dále bylo nutné zvolit vhodný materiál pro přípravu membrány a vhodný materiál podložky. Pro záznam motivu mřížek byla zvolena jednostranně leštěná křemíková deska (100) s oboustranně deponovanou nitridovou vrstvou (SIN) o tloušťce 80 nm nanesenou metodou LPCVD

4.4.2 Litografie z horní strany desky

Na leštěnou stranu desky byla magnetronovým naprašováním na vrstvu SIN nanесena tenká vrstva molybdenu ($w = 20\text{-}25\text{ nm}$). Na vrstvu molybdenu byla nanесena tenká vrstva elektronového rezistu PMMA MW = 950k o tloušťce 110 nm. Záznam mřížkového motivu do rezistu proběhl expozicí na elektronovém litografu EBPG5000plusES značky Vistec. Vyvolávání motivu proběhlo metodou imerze na odstředivce s použitím vysoce kontrastní vývojky na bázi IPA (IPA : H_2O v poměru 1 : 10). Kontrola vyvolávání probíhala jak pomocí optického mikroskopu tak pomocí profilometru. V dalším fázi byla odstraněna rezidua rezistu (zbytky rozpouštědel a polymeru v otvorech mřížkového motivu). Pro tento účel bylo využito plasmatický leptání v kyslíku, v zařízení Diener Nano plasma, což je plasmatická aparatura s válcovou komorou a kapacitně buzenou plasmou s frekvencí 40 kHz. Parametry leptání byly následující: průtok plynu 40 sccm, tlak v komoře 0,4 mbar, VF výkon 500 W (40 kHz), délka cyklu 90 s. Během tohoto kroku došlo k plošnému snížení tloušťky vrstvy PMMA o 25 nm (tj. asi o 22 % výchozí tloušťky). Současně došlo k důkladnému odhalení vrstvy nitridu v otvorech PMMA masky. Přenesení mřížkového motivu do vrstvy molybdenu pak proběhlo pomocí RIE v aparatuře s induktivně buzenou plasmou (z angl. *inductively coupled plasma*, ICP) značky Oxford Instruments. Pro leptání molybdenu byl zvolen recept s plynnou směsí *fluoridu sírového* SF_6 a *argonu* Ar. Parametry leptání vrstvy Mo bylo nejprve třeba experimentálně ověřit na řadě vzorků. Optimalizace procesu v tomto případě byla nutná, aby během této procedury nedošlo k leptání vrstvy nitridu.

Tab. 4.4.1 Procesní parametry leptání molybdenové masky

Krok	Plyn	Čas	Příkon ICP	Příkon RIE	$T_{\text{podložky}}$
Temperování	SF_6 (50 ccm) + Ar (40 ccm)	120 s	0	0	60 °C
Leptání	SF_6 (50 ccm) + Ar (40 ccm)	12 s	3000 W	10 W	60 °C

Kontrola hloubky leptání byla prováděna na profilometru s kontaktní sondou Alpha 120 značky KLA Tencor. Rychlost leptání Mo u zvoleného receptu byla stanovena

na 2 až 2,5 nm/s. Finální optimalizované parametry leptání použité při přenosu mřížkového motivu do Mo vrstvy jsou uvedeny v Tab. 4.4.1.

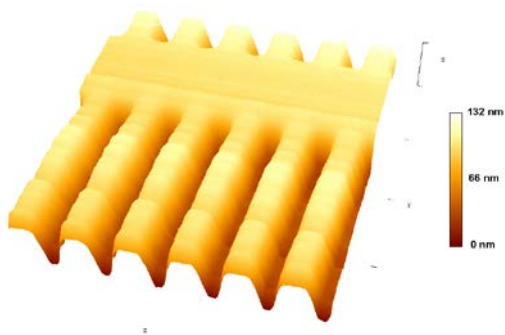
Následoval krok, během kterého došlo k odstranění vrstvy PMMA. Tento proces proběhl pomocí plasmatického spalování v kyslíku. Důvodem volby suché cesty odstranění rezistu byla snaha vyhnout se možné kontaminaci masky Mo v případě aplikaci rozpouštědel.

V dalším kroku proběhlo přenesení motivu mřížky do vrstvy SIN přes masku Mo metodou RIE. Pro leptání nitridu byla zvolena plynná směs *tetrafluormethanu* (CF_4) a *fluoroformu* (CHF_3). Selektivita leptání SIN přes masku Mo je u tohoto procesu přibližně 1 : 20 (Mo : SIN). Použití vrstvy Mo pro přenos motivu mřížky do vrstvy SIN je oproti přímému přenosu motivu přes PMMA výhodnější, protože nedochází k tak výraznému rozšíření leptaných otvorů v laterálním směru způsobenému úbytkem leptací masky. Přenos obrazu mřížky je pro tento případ tedy téměř dokonalý. Samotný proces leptání nitridové vrstvy byl jedním z kritických bodů celého procesu. Důvodem byl technologický požadavek na proleptání pouze 80 až 90 % celkové tloušťky vrstvy SIN. Důvod toho požadavku bylo, aby nedošlo k odhalení povrchu křemíku v otvorech leptaných v SIN, tj. aby povrch křemíku zůstal maskovaný alespoň tenkým zbytkem SIN. Tím, že část vrstvy nitridu kryla podložní křemíkový materiál, bylo zajištěno, že z této strany nebude docházet k leptání povrchu křemíku v pozdějším procesu anizotropního leptání otvoru ze zadní strany desky. Aby bylo dosaženo tohoto technologického požadavku, byl nutný zdlouhavý proces ladění parametrů leptání v aparatuře RIE, a to včetně zkoušek reprodukovatelnosti leptání. Aby bylo možné proces leptání lépe řídit, tj. aby leptání neprobíhalo příliš rychle, bylo třeba optimalizovat intenzitu buzení plasy snížením příkonu ICP. Z hlediska opakovatelnosti procesu leptání se projevila jako zásadní délka temperančního kroku. Ten hraje dvě role: jednak vyhřátí vzorku na pracovní teplotu a jednak homogenizaci koncentrací pracovních plynů v komoře před počátkem leptání. Pro teplotu 60 °C se osvědčila délka temperančního cyklu 180 až 240 s. Finální parametry leptání, které vedly k vyleptání otvorů do vrstvy SIN o hloubce 64–69 nm, jsou uvedeny v Tab. 4.4.2.

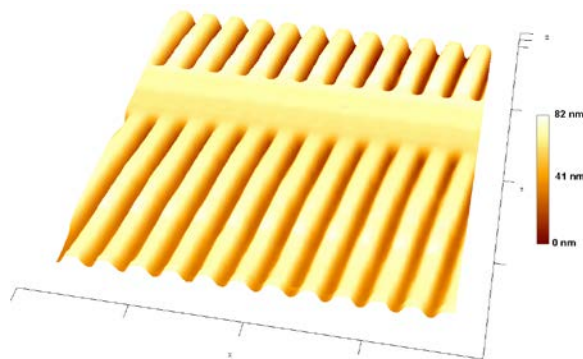
Tab. 4.4.2 Procesní parametry leptání nitridu křemíku přes molybdenovou masku.

Krok	Plyn	Čas	Příkon ICP	Příkon RIE	T _{podložky}
Temperování	CF_4 (10 ccm) + CHF_3 (40 ccm)	180 s	0	0	60 °C
Leptání	CF_4 (10 ccm) + CHF_3 (40 ccm)	26 s	1000 W	50 W	60 °C

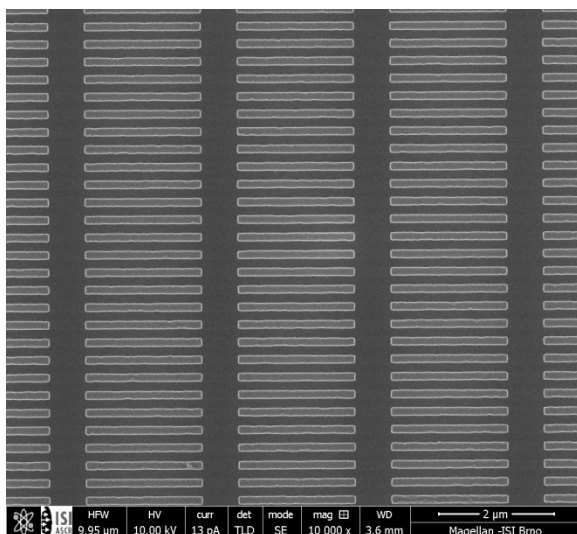
Inspekce mřížkového motivu po leptání proběhla na AFM Nano-R značky Pacific Nanotechnology (Obr. 4.4.3, Obr. 4.4.4) a SEM Magellan 400 značky FEI (Obr. 4.4.5, Obr. 4.4.6). Vyleptáním otvorů mřížkového motivu do nitridové vrstvy byl ukončen litografický proces z leštěné strany křemíkové desky (kroky a až h), a následoval litografický proces opracování z neleštěné (zadní) strany desky.



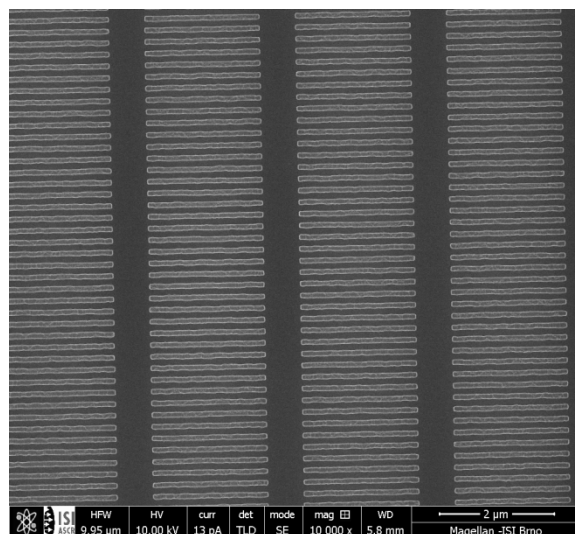
Obr. 4.4.3 Snímek leptaného motivu v SIN vrstvě z AFM; šířka čáry 200 nm a mezera 200 nm (rozsah na ose z je 132 nm).



Obr. 4.4.4 Snímek leptaného motivu v SIN vrstvě z AFM; šířka čáry 100 nm a mezera 200 nm (rozsah na ose z je 82 nm).



Obr. 4.4.5 Snímek leptaného povrchu nitridu po procesu RIE s mřížkovým motivem z SEM; motiv s šířkou čáry 200 nm a mezerou 200 nm.



Obr. 4.4.6 Snímek leptaného povrchu nitridu po procesu RIE s mřížkovým motivem z SEM; motiv s šířkou čáry 100 nm a mezerou 100 nm.

4.4.3 Příprava masky pro litografii ze zadní strany desky

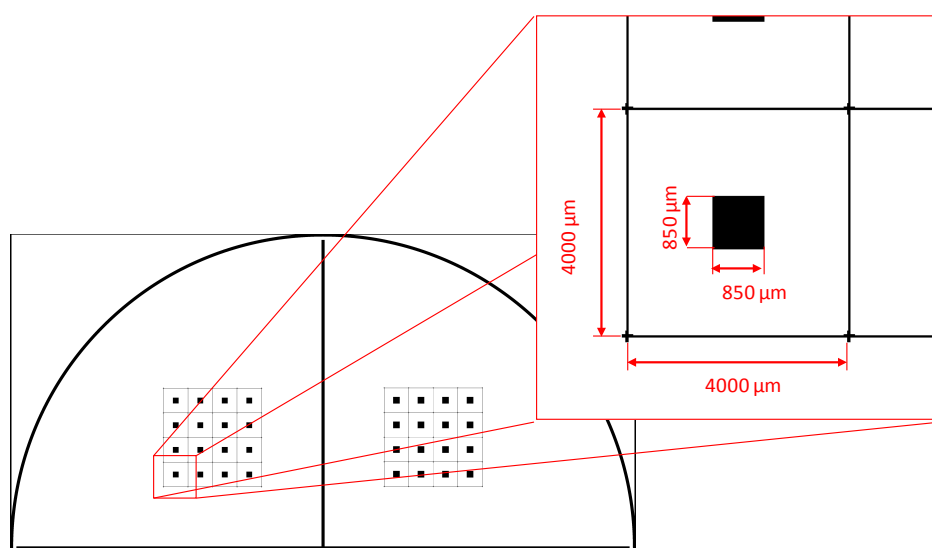
Během litografického procesu ze zadní strany desky bylo nutné do vrstvy SIN přenést obrazový motiv čtvercových otvorů, který se následně použije pro vymezení leptací reakce mokrého anizotropního leptání křemíku pouze na tyto otvory. Rozměry čtvercových otvorů v leptací masce byly dovozeny z technologických požadavků na rozměr membrány, hodnoty tloušťky křemíkové desky a krystalografie křemíku definující úhly, které mohou svírat krystalografické roviny, resp. tvar anizotropních leptů popsány v kapitole 2.4.3. Hloubku leptu lze pro leptání křemíku (100) odvodit z následujícího vzorce:

$$d = \frac{W_m - W_0}{2} \cdot \tan \theta, \quad (4.4.1)$$

kde d je hloubka leptu [μm], W_m je šířka otvorů v masce [μm], W_0 je šířka otvoru u dna leptu [μm], a θ je úhel mezi rovinou (100) a rovinami {111}, jenž má vždy hodnotu $54,74^\circ$. Z tohoto vzorce můžeme zpětně odvodit vztah pro výpočet šířky otvorů masky pro dosažení dané šířky membrány:

$$W_m = \frac{2d}{\tan \theta} + W_0. \quad (4.4.2)$$

Po dosazení do vzorce (4.4.2) zjistíme, že pro vytvoření membrány o šířce 100 μm je třeba vytvořit otvor v leptací masce ze zadní strany křemíkové desky ($d = 525 \mu\text{m}$) o šířce alespoň 842 μm . Vzhledem k tomu, že tloušťka desek je definovaná většinou s určitou tolerancí ($\pm 25 \mu\text{m}$) byl zvolen rozměr otvorů dvou šířek $W_m = 850 \mu\text{m}$ a 900 μm . Obrazový motiv pro tvorbu leptací masky ze zadní strany byl dále rozšířen o mřížku definující rozměry výsledného čipu s membránou o velikosti 4 mm \times 4 mm a motivy navigačních čar a značek umožňující soukryt obou litografií z horní i ze spodní strany desky, viz Obr. 4.4.7.



Obr. 4.4.7 Grafický design motivu UV masky.

Vzhledem k tomu, že návrh motivu leptací masky neobsahoval žádné jemné detaily (*minimum feature size*, MFS = 100 μm), byla pro jeho přenos na zadní stranu křemíkové desky vybrána jako vhodná technologie UV litografie. V první řadě však bylo nutno vyrobit chromovou UV masku nesoucí šablonu leptací masky, jež měla být dále přenesena do vrstvy SIN ze zadní strany křemíkové desky. Záznam obrazového motivu šablony proběhl na UV laserovém litografu typu *image matrix* do vrstvy pozitivního fotorezistu typu AZ1500 ($w = 530 \text{ nm}$) naneseného na skleněné desce (BK-7) s vrstvou chromu s nízkou reflexivitou (*low reflective chrome*, LRC) o tloušťce 80 nm. Po vyvolání rezistu ve vývojce na bázi TMAH (5%) byl obraz z rezistu přenesen do vrstvy LRC pomocí komerčního chromového leptadla s označením *TechniStrip Cr01* [48]. Posledním krokem přípravy UV masky bylo odstranění rezistové vrstvy v lázni *acetonu* následované opláchnutím v IPA.

4.4.4 Litografie ze zadní strany desky

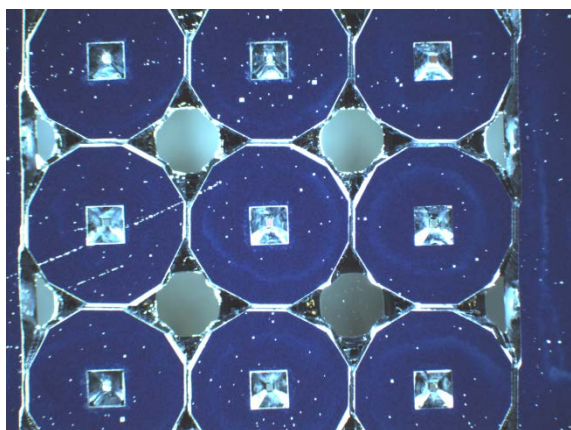
Jako záznamový materiál byla na zadní stranu křemíkové desky nanесena, metodou odstředivého lití, vrstva pozitivního fotorezistu MA-P-1210. Parametry depozice byly následující: max. odstředivá rychlost 1500 ot/min, akcelerace 330 ot/s², délka odstředování 60 s. Sušení vrstvy rezistu proběhlo na horké plotně s ohřevem IR po dobu 4 minut. Pro přenos obrazu z vyrobené UV masky do vrstvy SIN na zadní straně křemíkové desky

bylo zvoleno fotolitografické zařízení MA5 od výrobce SUSS MicroTec, pracujícího s UV zdrojem se rtuťovou výbojkou a umožňujícího soukryt a projekci chromových UV masek. Expozice motivu proběhla na zařízení MA5 v pracovním režimu tvrdého kontaktu masky a křemíkové desky s expoziční dávkou 216 mJ/cm^2 (tj. doba expozice 30 s). Vyvolání motivu proběhlo imerzí vzorku v roztoku komerční vývojky 303A [48] v koncentraci 1 : 5 (303A : H_2O) po dobu 30 s při teplotě 21°C .

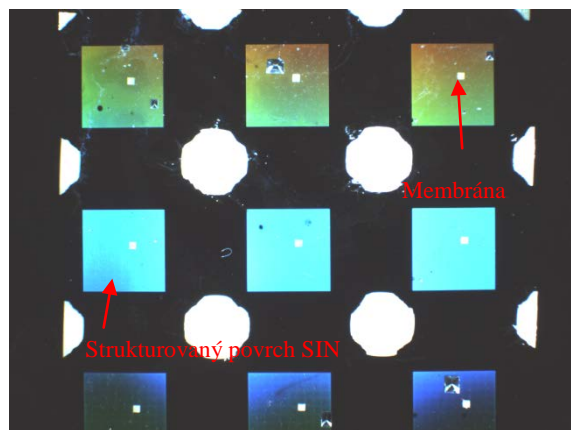
Následovalo leptání vrstvy SIN ze zadní strany přes motiv zaznamenaný ve fotorezistu, a to v aparatuře RIE. Pro leptání byl zvolen stejný recept jako pro leptání z horní strany desky s tím rozdílem, že v tomto případě bylo cílem proleptání celé tloušťky vrstvy SIN, proto byl zvolen delší čas leptání (50 s). Po ukončení leptání bylo nutno odstranit vrstvu fotorezistu. Pro tento účel se osvědčil nemaskovaný plošný osvit na zařízení MA5 po dobu 60 s a následná aplikace koncentrované alkalické vývojky typu 303A. Pro očištění desky od reziduí rezistu byla dále aplikována lázeň *acetonu* a IPA.

V dalším kroku výroby byl vzorek ponořen do temperované alkalické lázně tvořené roztokem KOH ve vodě o koncentraci 40 %_{hm}. Leptání křemíku přes masku vytvořenou na zadní straně desky probíhalo v lázni o teplotě 65°C po dobu 1450 minut. Teplota lázně byla udržována na konstantní teplotě pomocí termostatu. Aby bylo zajištěno plynulé leptání, byla lázeň po celou dobu promíchávána na magnetické míchačce. Po leptání byla provedena inspekce zadní i přední strany desky na optické lupě (Obr. 4.4.8, Obr. 4.4.9), na optickém mikroskopu (Obr. 4.4.10) a na SEM.

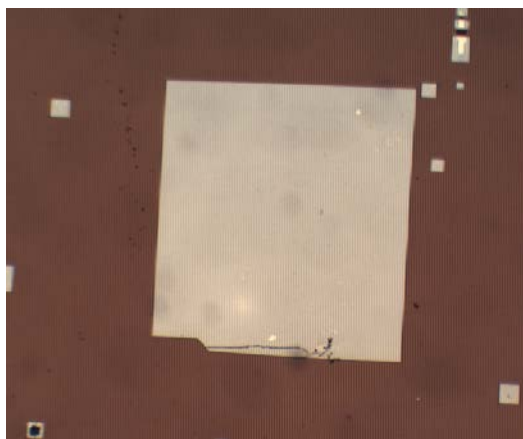
U prvních vzorků se objevovala po leptání v KOH z horní i ze zadní strany řada defektů. Nicméně pro danou aplikaci (difrakční mřížka pro elektronový svazek) to neznamenal omezení funkčnosti. Důležitější roli v tomto případě hrála kvalita realizace štěrbin tvořící mřížku na povrchu nitridu.



Obr. 4.4.8 Snímek zadní strany křemíkové desky z optické lupy po leptání v lázni KOH.



Obr. 4.4.9 Snímek přední strany desky z optické lupy po leptání v lázni KOH.



Obr. 4.4.10 Detail snímku membrány s mřížkovou strukturou ve vrstvě SIN při pohledu shora z optického mikroskopu.

4.4.1 Finální operace

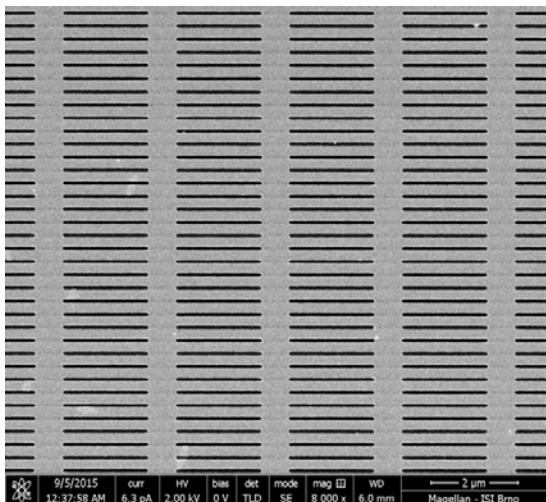
Po leptání v KOH a inspekci vytvořených membrán bylo nutné provést operaci, během které došlo k doleptání struktury mřížky tak, aby vznikly průchozí otvory. Při této operaci bylo nutné odleptat 10-15 nm z materiálu SIN, který byl použit jako maskovací materiál na horní straně desky během procesu leptání otvoru v lázni KOH. Pro tento účel byla zvolena metoda RIE s již osvědčeným receptem $\text{CF}_4 : \text{CHF}_3$.

V rámci optimalizace procesu bylo testováno, jaký směr leptání je pro doleptání vrstvy SIN výhodnější, zda z horní (ze strany struktury mřížky) nebo ze spodní strany (ze strany anizotropního leptu). Druhá část optimalizace byla věnována délce leptacího cyklu. Postupovalo se tak, že se zvolil kratší čas leptání, než by byla potřeba pro požadovanou úroveň proleptání SIN vrstvy. Následnou inspekci vzorku v SEM se ověřovalo, zda u vzorku došlo k otevření štěrbin v mřížce. Při optimalizaci procesu jsme došli k závěru, že optimální je leptání v jednom kroku směrem ze zadní strany membrány. V tomto případě dochází k minimalizaci výskytu otřepů v štěrbinách mřížky, navíc je menší pravděpodobnost, že membrána během procesu leptání nebo během další manipulace praskne. Ztenčení membrány SIN po tomto procesu bylo na tloušťku 55 až 65 nm. Během leptání také došlo k mírnému rozšíření štěrbin v laterálním směru, přibližně o 10 až 20 nm. Ověření velikosti rozšíření proběhlo inspekci vzorků membrán v SEM Magellan 400. Konečné parametry leptání jsou uvedeny v Tab. 4.4.3.

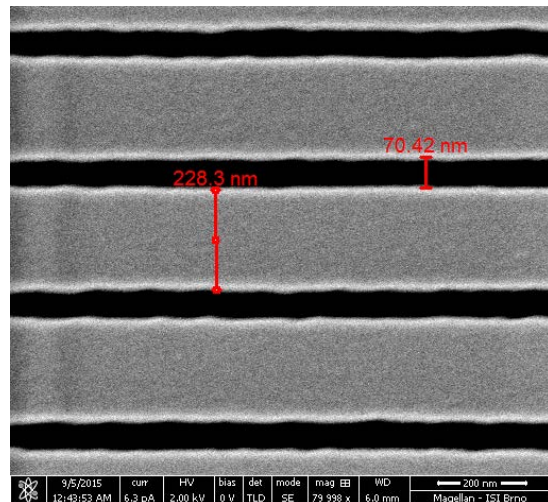
Tab. 4.4.3 Procesní parametry leptání zbytkové vrstvy nitridu křemíku pro vytvoření průchozích štěrbin.

Krok	Plyn	Čas	Příkon ICP	Příkon RIE	$T_{\text{podložky}}$
Temperování	CF_4 10 ccm) + CHF_3 (40 ccm)	120 s	0	0	60 °C
Leptání	CF_4 (10 ccm) + CHF_3 (40 ccm)	12 s	1000 W	50 W	60 °C

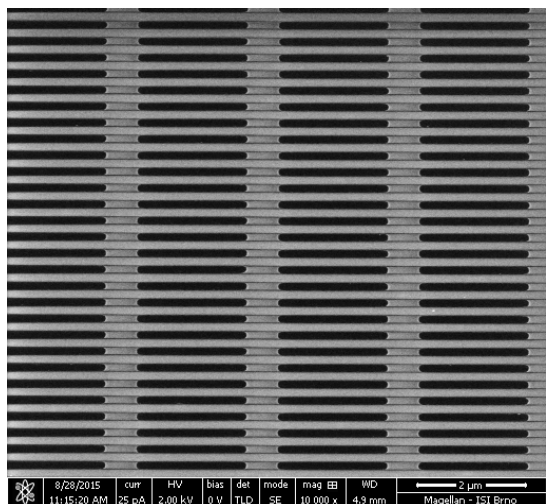
Poslední operací výroby bylo vylámání jednotlivých čipů s membránami z křemíkové desky, jejich inspekce v SEM Magellan 400 (viz Obr. 4.4.11 až Obr. 4.4.14), a pro danou aplikaci také depozice tenké vrstvy *platiny* na povrch membrány. Metalizace membrány byla nutná z aplikačního důvodu, kdy bylo třeba splnit požadavek na dobrou vodivost jejího povrchu.



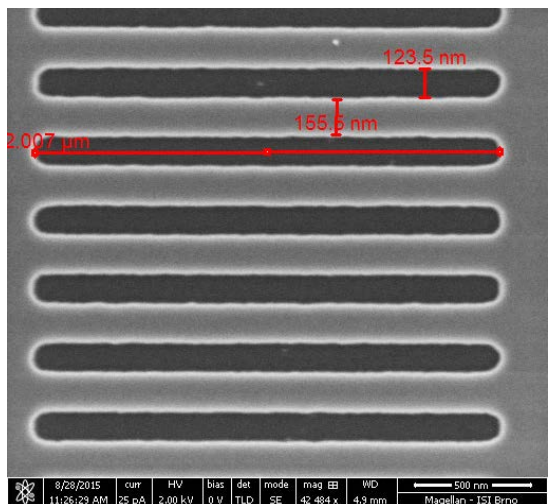
Obr. 4.4.11 SEM snímek povrchu strukturované membrány s průchozími otvory; motiv čára 50 nm a mezera 250 nm.



Obr. 4.4.12 SEM snímek detailu povrchu strukturované membrány s průchozími otvory; motiv čára 50 nm a mezera 250 nm; rozšíření čar o ≈ 20 nm.



Obr. 4.4.13 SEM snímek povrchu strukturované membrány s průchozími otvory; motiv čára 100 nm a mezera 200 nm



Obr. 4.4.14 SEM snímek detailu povrchu strukturované membrány s průchozími otvory; motiv čára 100 nm a mezera 200 nm; rozšíření čar o ≈ 23 nm.

Využití technologie přípravy membrán se plánuje také v budoucnosti při tvorbě komplexnějších mřížkových struktur pro úpravy optických vlastností elektronových svazků s nízkou kinetickou energií. Další možnou aplikační oblastí je příprava optických prvků jako jsou například polarizátory pro rentgenovou spektroskopii s měkkým RTG zářením. Vývoj probíhá také v oblasti využití této technologie pro přípravu metrických standardů pro kalibraci zorných polí SEM, TEM a STEM mikroskopů. Z hlediska publikačního proběhla prezentace výsledků z měření elektronových svazků na vzorcích membrán [M49], [M51]. V přípravě je publikace do impaktovaného časopisu týkající se technologie přípravy těchto membrán.

5 Diskuze a závěr

V mikrotechnologiích a nanotechnologiích je nutný neustálý výzkum a vývoj posouvající hranice těchto technologií při tvorbě funkčních mikro a nano struktur. Jednou z technik, která zasahuje do obou výše zmíněných oblastí je elektronová litografie (*electron beam lithography*, EBL). Tato technologie umožňuje zápis velice jemných struktur v submikronovém, nebo i sub–100 nm rozlišení.

Tato práce je jako celek zaměřena na výzkum a vývoj v oblasti vytváření mikrostruktur technologií EBL. Jako důsledek důkladného teoretického rozboru, ale i řady experimentů, přináší nové poznatky a možnosti záznamu hlubokých binárních i víceúrovňových mikrostruktur.

Samostatná část práce je věnovaná možnostem přímého zápisu a tvorby víceúrovňových struktur tzv. šedou elektronovou litografií. V rámci hojného počtu experimentů, které jsou v práci prezentovány, je charakterizován proces tvorby víceúrovňových struktur šedou EBL i následné optimalizaci strategie zápisu a datové přípravy pro vylepšení vlastností zaznamenávaných mikrostruktur (například vyhlazení povrchu).

V rámci další z kapitol se práce zabývá řešení problematiky rozptylových jevů a jevu blízkosti EBPE (*electron beam proximity effect*), ke kterým dochází v průběhu záznamu struktur elektronovým svazkem interakcí urychlených elektronů a hmoty rezistu a podložky. Prezentuje inovativní postup tvorby modelu dávkového ozáření pro dané obrazové podklady mikrostruktur. Nastiňuje řešení optimalizace datových vstupů (modulace expozičních dávek pro jednotlivé zápisové body) umožňující kompenzaci rozptylových jevu (*proximity effect correction*, PEC) u daného litograficky zaznamenávaného mikroobjektu. V rámci práce je experimentálně je potvrzena funkčnost PEC algoritmů na zařízení ELG BS600 při záznamu binárních motivů se submikronovým rozlišením a detaily (*minimum features size*, MFS), které jinak bylo na zvoleném zařízení značně problematické vytvářet.

Pro překonání fyzikálních limitů EBL při tvorbě hlubokých mikroreliéfních struktur je rozebírána možnosti kombinace s dalšími mikrovýrobními technikami jako je: suché plasmatické, reaktivní iontové a mokré anizotropní leptání. Rozborem, charakterizací a aplikací technik přenosu reliéfu leptáním je věnována samostatná kapitola práce. Vlastní práce je završena zužitkováním dosavadních zkušeností z oblastí mikrolitografie a mikrovýroby při návrhu technologického postupu výroby MMS (*multifunctional micro systems*) — křemíkový čip s nano–strukturovanou membránou — optimalizaci procesu výroby a realizaci funkčních vzorků.

Publikované i dosud nepublikované výsledky a poznatky z této práce již byly implementovány do pracovních postupů při výrobě mikro a nano strukturovaných povrchu technologiemi EBL a leptání. Navazující práce by měly rozvinout myšlenku aplikace technologie přípravy strukturovaných membrán pro MMS a MEMS (*microelectromechanical systems*), například v oblasti senzoriky a mikrofluidních systémů. Významná oblast aplikace

membrán by měla být v rámci připravované spolupráce s KBSI (*Korea Basic Science Institute*) na vývoji optických prvku pro měkkou rentgenovou spektroskopii. Připravována je i druhá fáze výroby membrán s pokročilými mřížovými strukturami. Tyto budou využity při experimentu v SEM pro sledování koherenčních vlastností elektronových svazků pro nízké kinetické energie primárních elektronů. Výsledky experimentu budou následně publikovány. Další a nikoliv poslední oblastí vývoje bude téma přípravy přesných metrologických standardu pro kalibraci zorných polí transmisních elektronových mikroskopů (TEM, STEM), o které již projevila zájem společnost FEI a.s.

Dílčí části disertační práce byly prezentovány na mezinárodních konferencích (*NANOCON, ICMNE, International Microscopy Conference*), jejíž sborníky jsou indexovány v databázi *Thomson Reuters*, v impaktovaném časopise vydávaném v ČR — *Chemické listy* (IF 0,272), dále v časopise uvedeném na seznamu recenzovaných neimpaktovaných periodik vydávaných v ČR — *Jemná mechanika a optika*, a na několika národních (*Nečtiny, LASER*) a mezinárodních (*ICMM, Recent Trends in Charge Particle Optics, IDS*) konferencích a workshopech. V rozpracovaném stavu je podání článku v impaktovaném časopise *Microelectronic Engineering* (IF 1,277) a *Ultramicroscopy* (IF 2,874) na téma v práci prezentované technologie výroby MMS struktur.

Závěrem lze konstatovat, že práce umožnila posun fyzikálních, technický i technologických možností při realizaci mikrostruktur záznamem na elektronovém litografu Tesla BS600. Poznatky z experimentů, které proběhly v rámci řešení témat práce, umožnily vývoj nových litografických postupů a jejich komerční i výzkumné využití.

Použitá literatura

- [1] Franssila S., Introduction to Microfabrication (2004).
- [2] Rai-Choudhury P., Handbook of microlithography micromachining, and microfabrication, Volume 1: Microlithography, SPIE (1997)
- [3] Madou J. M., Fundaments of Microfabrication: the science of miniaturization (Second Edition)
- [4] Wolf S., Tauber R. N., Silicon processing for VLSI Era Vol. 1: Process technology Sunset Beach: Lattice press (1986)
- [5] Utke I., Moshkalev S., Russel P., Nanofabrication using focused ion and electron beams: principles and applications, Oxford university press, (2012).
- [6] Cabrini S., Kawata S., Nanofabrication Handbook, CRC Press, (2012).
- [7] Cui Z., Nanofabrication: principles, capatibilites and limits, Springer (2008)
- [8] Nishi Y., Doering R., Handbook of semiconductor manufacturing technology, Marcel Dekker, Inc., (2000).
- [9] Manfirnato R. V., Yhang L., Su D., Duan H., Hobbs R.G., Stach E. A., Berggen K. K., Resolution limits of electron-beam litographz towards the atomic scale, Nano lett., American Chemical Society, (2013).
- [10] Grigorescu A.E., van der Krogt M. C., Hagen C.W., Sub-10nm structures written in ultra-thin HSQ resist layers, using Electron beam lithography, Proc. of SPIE Vol. 6519 (2007)
- [11] Stepanova M., Dew S., Nanofabrication, Chap. 2 : Fundaments of electron beam exposure and Development, Springer (2012)
- [12] Suzuki, K., Matsushi, S., Ochiai, Y., Sub-half-micron lithography for, Cambridge University press,(2000), s. 107-150
- [13] Kampherbeek B. J., MAPPER: High Throughput Maskless Lithography, Litho Extensions workshop , Kobe, Japan (2010) , Dostupné z WWW: <http://www.mapperlithography.com/products/customer-benefits>
- [14] Matějka F., Praktická elektronová litografie, ÚPT AVČR (2013)
- [15] Matějka F., Elektronový litograf BS600 a jeho technologické aplikace., Zpravodaj ÚPT Brno, ÚPT AVČR (1988)
- [16] Matějka F., Elektronová litografie - nástroj i pro nanotechnologie?, ÚPT AVČR (2002)
- [17] Krátký S., Technologie leptání křemíku, VUT Brno (2012)

- [18] Crystec Technology Trading GmbH, Deposition of silicon nitride layers. Si₃N₄. Dostupné z WWW: <https://www.crystec.com/kllnitre.htm>
- [19] Matějka F., Elektronová litografie: teoretické základy a rezistové procesy, [online], (2008), Dostupné z WWW: http://www.isibrno.cz/teams/eb1/eb1_fm.pps
- [20] Suné G, R., Electron Beam lithography for nanofabrication, Institute of Microelectronica de Barcelona (2008)
- [21] Cord M. Bryan, Achieving Sub-10 nm Resolution using Scanning Electron Beam Litography, MIT (2009).
- [22] Orloff J., Handbook of Charged particle optics, second edition, CRC Press (2009)
- [23] Richard A., Mc Nie M, Characterisation of optimization of deep dry etching of MEMS applications, proceeding of SPIE ICM and MEMS Tech., (2001)
- [24] Laermer F., Schilp A., Funk K., Offenbergh M., Bosch deep silicon etching: Improving uniformity and etch rate for advanced MEMS applications
- [25] Zhou R., Zhang H., Hao Y., Wang Y., Simulation of the Bosch process with a string-cell hybrid method, J. Micromech. Microeng. 14 (2004) p.851-858.
- [26] Methods of proximity effect correction in electron lithography. Geraint Owen JVST 1990.
- [27] Kraats, van de A., Murali R., Proximity effect in E-beam lithography. Dostupné z WWW: <http://nanolithography.gatech.edu/proximity.htm>
- [28] Urbánek M., Kolařík V., Král S., Dvořáková M., Determination of proximity effect forward scattering range parameter in e-beam lithography. *In Proc. 12th Int'l Seminar on Recent Trends in CPO (2010)*, p. 67-68.
- [29] Murai F., Yoda H., Okazaki S., Saitou N., Sakitani Y., Fast proximity effect correction method using a pattern area density map, Journal of Vac. Sci. and Technol. B 10, 30072 (1992)
- [30] Hrach R., Hrachová V., Vicher M., Kinetics of reactions in DC glow discharge in oxygen
- [31] Friedman A., Plasma Chemistry, Cambridge University press (2008)
- [32] Dennis M. Manos, Daniel L. Flamm, Plasma Etching: An Introduction
- [33] Quirk M., Serda J., Semiconductor manufacturing technology
- [34] Shul R. J., Pearton S. J., Handbook of advanced plasma processing techniques. Springer (2000).

- [35] Riekerink O. M., Structural and chemical modification of polymer surfaces by gas plasma etching
- [36] Pang S. W., Sung K. T., Ko K. K., Etching of photoresist using oxygen plasma generated by multipolar electron cyclotron resonance source, *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 10, No. 3, (1992)
- [37] Kirt W.R., Muller R.S., Etch rates for micromachining processing , *Journal of micromechanical systems*, Vol. 5, No. 4, IEEE (1996)
- [38] Kirt W.R., Gupta K, Wasilik M., Etch rates for micromachining processing - Part II, *Journal of micromechanical systems*, Vol. 1, No. 6, IEEE (2003)
- [39] Battey J. F., *IEEE Tran. Electron Devices* ED-24, 140 (1977)
- [40] Taylor G. N., Wolf T. M., *Polymer Eng. Sci.* 20, 1087 (1980)
- [41] Torres J., Perry C. C., Bransfield S.J., Fairbrother D. H., Radical Reaction with organic thin films: Chemical interaction of atomic oxygen with an X-ray modified self-assembled monolayer, *J Phys. Chem. B*, 6265-6272, (2002)
- [42] M. L. Schattenburg, R. J. Aucoin, R. C. Fleming, I. Plotnik, J. Porter, and H. I. Smith, *Proc. SPIE* 2280, 181 1994 .
- [43] J. Ferrera, V. V. Wong, S. Riston, V. Boegli, E. H. Anderson, D. P. Kern, and H. I. Smith, *J. Vac. Sci. Technol. B* 11, 2342 1993 .
- [44] Anderson E. H., Chao W., Gullikson E.M., Rekawa S., Anderson N., Naulleau P., Silicon nitride zoneplates and packaging fro extreme ultraviolet intruments., *JVST B*, 31, (2013)
- [45] Sankha S. Sarkar, Pratap K. Sahoo, Harun H. Solak, Christian David, and J. Friso Van der Veen, Fabrication of Fresnel zone plates by holography in the extreme ultraviolet region, *JVST B* 26, 2160 (2008) .
- [46] Escobedo, C., On-chip nanohole array based sensing: a review, *Lab Chip*, 2013, 13, 2445
- [47] McMorran B., Perreault J. D., Savas T. A., Cronin A., Diffraction of 0,5 keV electrons from free-standing transmission gratings., *Ultramicroscopy* 16 (2006), 356-364.
- [48] MicroChem 303 A Developer data sheet. Dostupné z WWW:
<http://www.microchem.com/pdf/MCC%20303%20A%20Developer%201.15.pdf>
- [49] Technistrip Cr01 data sheet.Dostupné z WWW:
http://microchemicals.com/micro/tf/tds_TechEtch_Cr01_VLS.pdf
- [50] AZ 1500 series UV photoresist. Dostupné z WWW:
http://www.microchemicals.com/micro/az_1500_series.pdf

- [51] AR-N-4400(CAR44) data sheet. Dostupné z WWW: http://www.allresist.com/wp-content/uploads/sites/2/2014/03/allresist_produkinfos_ar-n4400_englisch.pdf
- [52] SU-8 2000 processing guidelines. Dostupné z WWW: http://www.microchem.com/pdf/SU-82000DataSheet2000_5thru2015Ver4.pdf
- [53] NANO PMMA and Copolymer product attributes. Dostupné z WWW: http://microchem.com/pdf/PMMA_Data_Sheet.pdf

Seznam vlastních publikací

- [M1] BOK, J., KOLAŘÍK, V., HORÁČEK, M., **MATĚJKA, M.**, MATĚJKA, F. Modified knife-edge method for current density distribution measurements in e-beam writers. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. Roč. 31, č. 3, 2013, 031603:1-6.
- [M2] BOK, J., HORÁČEK, M., KOLAŘÍK, V., URBÁNEK, M., **MATĚJKA, M.**, KRYŽÁNEK, V. Measurements of Current Density Distribution in Shaped E-beam Writers. *Microelectronic Engineering*. Roč. 149, 2016, s. 117–124.
- [M3] HORÁČEK, M., KOLAŘÍK, V., URBÁNEK, M., MATĚJKA, F., **MATĚJKA, M.** Thin Metallic Layers Structured by E-beam Lithography. *Proc's of 21st Int'l Conference on Metallurgy and Materials*. Ostrava: TANGER, 2012. ISBN 978-80-87294-29-1.
- [M4] **MATĚJKA, M.** Preparation of Multilevel Phase-Diffractive Optic Structures by Electron Beam Lithography. *Proceedings of the Elektronika a informatika 2010 conference*. Nečtiny: Západočeská univerzita v Plzni, s. 53-56. ISBN 978-80-7043-913-5.
- [M5] **MATĚJKA, M.** Behavior of SU-8 Epoxy Based Negative UV-Photoresist as Negative Tone Resist for Elektron-beam Lithography. *Proceedings of the 16th conference Student EEITC 2010 volume 4*. Brno: VUT Brno, FEKT and FIT, s. 222-226. ISBN 978-80-214-4079-1.
- [M6] **MATĚJKA, M.**, REK, A., MIKA, F., FOŘT, T., MATĚJKOVÁ, J. Comparison of Techniques for Diffraction Grating Topography Analysis. *Proceedings of the 12th International Seminar on Recent Trends in Charged Particle Optics and Surface Physics Instrumentation*. Brno: Institute of Scientific Instruments ASCR, v.v.i., 2010, s. 29-32. ISBN 978-80-254-6842-5.
- [M7] BUCHTA, Z., JEDLIČKA, P., **MATĚJKA, M.**, KOLAŘÍK, V., MIKEL, B., LAZAR, J., ČÍP, O. White-Light Fringe Analysis with Low-Cost CCD Camera. *Fringe 2009 - 6th International Workshop on Advanced Optical Metrology*. Heidelberg: Springer, 2009, s. 149-152. ISBN 978-3-642-03050-5.
- [M8] BUCHTA, Z., JEDLIČKA, P., **MATĚJKA, M.**, KOLAŘÍK, V., MIKEL, B., LAZAR, J., ČÍP, O. White-Light Interference Fringe Detection Using Color CCD Camera. *Africon 2009*. Los Alamitos: IEEE, 2009. 5308093: 1-5. ISBN 978-1-4244-3918-8.
- [M9] HORÁČEK, M., KRÁTKÝ, S., URBÁNEK, M., KOLAŘÍK, V., MELUZÍN, P., **MATĚJKA, M.**, CHLUMSKÁ, J. Exposure Time Comparison between E-Beam Writer with Gaussian Beam and Variable Shaped Beam. *NANOCON 2014. 6th International conference proceedings*. Ostrava: TANGER, 2014. ISBN 978-80-87294-55-0.
- [M10] HORÁČEK, M., BOK, J., KOLAŘÍK, V., URBÁNEK, M., **MATĚJKA, M.**, KRÁTKÝ, S. Measurement of current density distribution in shaped e-beam writers. *18th International Microscopy Congress. Proceedings*. Praha: Czechoslovak Microscopy Society, 2014. ISBN 978-80-260-6720-7.
- [M11] HORÁČEK, M., MATĚJKA, F., KOLAŘÍK, V., **MATĚJKA, M.**, URBÁNEK, M. Nano modification of the W(100)/ZrO electron emitter tip using reactive ion etching. *NANOCON 2012, 4th International Conference Proceedings*. Ostrava: TANGER, 2012, s. 723-728. ISBN 978-80-87294-32-1.

- [M12] HORÁČEK, M., KOLAŘÍK, V., **MATĚJKA, M.**, URBÁNEK, M., KRÁTKÝ, S., CHLUMSKÁ, J., KRÁL, S. Nano modifikace hrotu W(100)/ZrO elektronového emitéru reaktivním iontovým leptáním. *Jemná mechanika a optika*. Roč. 57, č. 10, 2012, s. 278-280. ISSN 0447-6441.
- [M13] HORÁČEK, M., KOLAŘÍK, V., **MATĚJKA, M.**, URBÁNEK, M., KRÁTKÝ, S., CHLUMSKÁ, J., KRÁL, S. SMV-2013-01: Reliéfní struktury na principu difraktivní optiky. Brno: API Optix s.r.o., 2013, s. 6.
- [M14] HORÁČEK, M., KOLAŘÍK, V., **MATĚJKA, M.**, URBÁNEK, M., KRÁTKÝ, S., CHLUMSKÁ, J., KRÁL, S. SMV-2013-15: Reliéfní struktury na principu difraktivní optiky. Brno: IQ Structures, s.r.o., 2013, s. 6.
- [M15] HORÁČEK, M., KOLAŘÍK, V., **MATĚJKA, M.**, URBÁNEK, M., KRÁTKÝ, S., CHLUMSKÁ, J., MELUZÍN, P., KRÁL, S. SMV-2014-01: Reliéfní struktury na principu difraktivní optiky. Brno: API Optix s.r.o., 2014, s. 2.
- [M16] HORÁČEK, M., KOLAŘÍK, V., **MATĚJKA, M.**, KRÁTKÝ, S., CHLUMSKÁ, J., MELUZÍN, P., KRÁL, S. SMV-2015-12: Reliéfní struktury na principu difraktivní optiky. Brno: API Optix s.r.o., 2015, s. 10.
- [M17] HORÁČEK, M., KOLAŘÍK, V., **MATĚJKA, M.**, KRÁTKÝ, S., CHLUMSKÁ, J., MELUZÍN, P., KRÁL, S. SMV-2015-14: Technologie elektronové litografie. Brno: Optaglio s.r.o., 2015, s. 4.
- [M18] HORÁČEK, M., KOLAŘÍK, V., **MATĚJKA, M.**, KRÁTKÝ, S., CHLUMSKÁ, J., MELUZÍN, P., KRÁL, S. SMV-2015-15: Vývoj amplitudově fázové masky. Brno: Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, 2015, s. 6.
- [M19] CHLUMSKÁ, J., KOLAŘÍK, V., KRÁTKÝ, S., **MATĚJKA, M.**, URBÁNEK, M., HORÁČEK, M. Lift-off technique using different e-beam writers. *NANOCON 2013, 5th International conference proceedings*. Ostrava: TANGER, 2013, s. 286-290. ISBN 978-80-87294-47-5.
- [M20] KOLAŘÍK, V., **MATĚJKA, M.**, MATĚJKA, F., KRÁTKÝ, S., URBÁNEK, M., HORÁČEK, M., KRÁL, S., BOK, J. Calibration specimens for microscopy. *NANOCON 2012, 4th International Conference Proceedings*. Ostrava: TANGER, 2012, s. 713-716. ISBN 978-80-87294-32-1.
- [M21] KOLAŘÍK, V., HORÁČEK, M., MATĚJKA, F., **MATĚJKA, M.**, URBÁNEK, M., KRÁTKÝ, S., KRÁL, S., BOK, J. E-beam pattern generator BS600 and technology zoom. *NANOCON 2012, 4th International Conference Proceedings*. Ostrava: TANGER, 2012, s. 822-825. ISBN 978-80-87294-32-1.
- [M22] KOLAŘÍK, V., KRÁTKÝ, S., URBÁNEK, M., **MATĚJKA, M.**, CHLUMSKÁ, J., HORÁČEK, M. Microstructuring of metallic layers for sensor applications. *METAL 2013 Conference Proceedings, 22nd International Conference on Metallurgy and Materials*. Ostrava: TANGER, 2013, s. 1069-1073. ISBN 978-80-87294-41-3.

- [M23] KOLAŘÍK, V., MATĚJKA, F., HORÁČEK, M., **MATĚJKA, M.**, URBÁNEK, M.
Nanolitografie a kompenzace magnetického pole v prostředí s průmyslovým rušením. *Jemná mechanika a optika*. Roč. 56, č. 11-12, 2011, s. 312-316. ISSN 0447-6441.
- [M24] KOLAŘÍK, V., **MATĚJKA, M.** Počítačem generované hologramy - CGH. *Sborník příspěvků multioborové konference LASER52*. Brno: Ústav přístrojové techniky AV ČR, v. v. i., 2012, s. 31. ISBN 978-80-87441-08-4.
- [M25] KOLAŘÍK, V., **MATĚJKA, M.**, URBÁNEK, M., KRÁL, S., KRÁTKÝ, S., MIKŠÍK, P., VAŠINA, J. Proximity effect simulation for variable shape e-beam writer. *Proceedings of the 13th International Seminar on Recent Trends in Charged Particle Optics and Surface Physics Instrumentation*. Brno: Institute of Scientific Instruments AS CR, v.v.i., 2012, s. 75-76. ISBN 978-80-87441-07-7.
- [M26] KOLAŘÍK, V., **MATĚJKA, M.**, URBÁNEK, M., KRÁTKÝ, S., CHLUMSKÁ, J., HORÁČEK, M., KRÁL, S. SMV-2012-01: Testovací preparát pro SEM. Brno: FEI Czech Republic s.r.o., 2012, s. 5.
- [M27] KOLAŘÍK, V., HORÁČEK, M., URBÁNEK, M., **MATĚJKA, M.**, KRÁTKÝ, S., CHLUMSKÁ, J., BOK, J. Structural Color of Metallic Surfaces. *METAL 2014. 23. ročník mezinárodní konference metalurgie a materiálů. Conference Proceedings*. Ostrava: TANGER, 2014, s. 962-967. ISBN 978-80-87294-52-9.
- [M28] KOLAŘÍK, V., MATĚJKA, F., **MATĚJKA, M.**, HORÁČEK, M., URBÁNEK, M., BOK, J., KRÁTKÝ, S., KRÁL, S., MIKA, F. What is the buzz about the TZ mode. *Proceedings of the 13th International Seminar on Recent Trends in Charged Particle Optics and Surface Physics Instrumentation*. Brno: Institute of Scientific Instruments AS CR, v.v.i., 2012, s. 37-38. ISBN 978-80-87441-07-7.
- [M29] KRÁTKÝ, S., MELUZÍN, P., URBÁNEK, M., **MATĚJKA, M.**, CHLUMSKÁ, J., HORÁČEK, M., KOLAŘÍK, V. Amplitudově fázová vortexová maska. *Sborník příspěvků multioborové konference LASER 55*. Brno: Ústav přístrojové techniky AV ČR, 2015, s. 32-33. ISBN 978-80-87441-16-9.
- [M30] KRÁTKÝ, S., KOLAŘÍK, V., **MATĚJKA, M.**, URBÁNEK, M., HORÁČEK, M., CHLUMSKÁ, J. Comparison of ultimate resolution achieved by e-beam writers with shaped beam and with Gaussian beam. *NANOCON 2013. 5th International conference proceedings*. Ostrava: TANGER, 2013, s. 392-398. ISBN 978-80-87294-47-5.
- [M31] KRÁTKÝ, S., KOLAŘÍK, V., URBÁNEK, M., **MATĚJKA, M.**, HORÁČEK, M., CHLUMSKÁ, J., NEDĚLA, V., JAFFREZIC-RENAULT, N., KREJČÍ, J., KUČEROVÁ, R., PLÍČKA, R., KREJČÍ, T. Differential conductometry biosensors prepared by lift-off technique by using of e-beam writer with shaped beam. *39th International Conference on Micro and Nano Engineering MNE2013. Book of Abstracts*. Cambridge: University of Cambridge, 2013, s. 387.
- [M32] KRÁTKÝ, S., KOLAŘÍK, V., URBÁNEK, M., PATÁK, A., HORÁČEK, M., **MATĚJKA, M.** E-beam Nano-patterning for Electroforming Replication. *NANOCON 2014. 6th International conference proceedings*. Ostrava: TANGER, 2014. ISBN 978-80-87294-55-0.

- [M33] KRÁTKÝ, S., URBÁNEK, M., KOLAŘÍK, V., HORÁČEK, M., CHLUMSKÁ, J., **MATĚJKA, M.**, ŠERÝ, M., MIKEL, B. Fázové masky vyrobené elektronovou litografií a iontovým leptáním pro přípravu vláken s Braggovými mřížkami. *Sborník příspěvků multioborové konference Laser54*. Brno: Ústav přístrojové techniky AV ČR, 2014, s. 31-32. ISBN 978-80-87441-13-8.
- [M34] KRÁTKÝ, S., URBÁNEK, M., CHLUMSKÁ, J., **MATĚJKA, M.**, MELUZÍN, P., KOLAŘÍK, V., HORÁČEK, M. Kombinace elektronové litografie s gaussovským svazkem a s proměnným tvarovaným svazkem. *Jemná mechanika a optika*. Roč. 60, č. 1, 2015, s. 10-13. ISSN 0447-6441.
- [M35] KRÁTKÝ, S., KOLAŘÍK, V., HORÁČEK, M., **MATĚJKA, M.**, CHLUMSKÁ, J., MELUZÍN, P., KRÁL, S. SMV-2015-13: Reliéfní struktury na principu difrakтивní optiky. Brno: Optometrics Corp, 2015, s. 4.
- [M36] MATĚJKA, F., HORÁČEK, M., KOLAŘÍK, V., **MATĚJKA, M.** Thermal-field electron emission W(100)/ZrO cathode: facets versus edges. *Proceedings of the 13th International Seminar on Recent Trends in Charged Particle Optics and Surface Physics Instrumentation*. Brno: Institute of Scientific Instruments AS CR, v.v.i., 2012, s. 27-28. ISBN 978-80-87441-07-7.
- [M37] **MATĚJKA, M.**, URBÁNEK, M., KOLAŘÍK, V. Scanning Probe Microscopy: Measuring on Hard Surfaces. *NANOCON 2011. 3rd International Conference*. Ostrava: TANGER, 2011, s. 701-704. ISBN 978-80-87294-27-7.
- [M38] **MATĚJKA, M.**, KOLAŘÍK, V., URBÁNEK, M., KRÁTKÝ, S., CHLUMSKÁ, J., HORÁČEK, M., KRÁL, S. SMV-2012-12: Testovací preparát pro SEM. Brno: TESCAN, 2012, s. 3.
- [M39] **MATĚJKA, M.**, HORÁČEK, M., MELUZÍN, P., CHLUMSKÁ, J., KRÁL, S., KOLAŘÍK, V., URBÁNEK, M., KRÁTKÝ, S. SMV-2014-28: Vývoj testovacích preparátů pro REM. Brno: TESCAN, 2014, s. 2.
- [M40] **MATĚJKA, M.**, HORÁČEK, M., MELUZÍN, P., CHLUMSKÁ, J., KRÁL, S., KOLAŘÍK, V., KRÁTKÝ, S. SMV-2015-35: Vývoj testovacích preparátů pro REM. Brno: TESCAN, 2015, s. 4.
- [M41] MELUZÍN, P., HORÁČEK, M., URBÁNEK, M., BOK, J., KRÁTKÝ, S., **MATĚJKA, M.**, CHLUMSKÁ, J., KOLAŘÍK, V. Some Other Gratings: Benchmarks for Large-Area E-Beam Nanopatterning. *NANOCON 2014. 6th International conference proceedings*. Ostrava: TANGER, 2014. ISBN 978-80-87294-55-0.
- [M42] URBÁNEK, M., KRÁTKÝ, S., **MATĚJKA, M.**, KOLAŘÍK, V., HORÁČEK, M. Metody zápisu nanostruktur rastrovací sondou. *Chemické listy*. Roč. 108, č. 10, 2014, s. 937-941. ISSN 0009-2770.
- [M43] URBÁNEK, M., KOLAŘÍK, V., KRÁTKÝ, S., **MATĚJKA, M.**, HORÁČEK, M., CHLUMSKÁ, J. Monte-Carlo simulation of proximity effect in e-beam lithography. *NANOCON 2013. 5th International conference proceedings*. Ostrava: TANGER, 2013, s. 723-726. ISBN 978-80-87294-47-5.

- [M44] URBÁNEK, M., KRÁTKÝ, S., ŠIMÍK, M., KOLAŘÍK, V., HORÁČEK, M., **MATĚJKA, M.** Plasmonic Structures In PMMA Resist. *NANOCON 2014. 6th International conference proceedings*. Ostrava: TANGER, 2014. ISBN 978-80-87294-55-0.
- [M45] URBÁNEK, M., KRÁTKÝ, S., **MATĚJKA, M.**, KOLAŘÍK, V., HORÁČEK, M. Plasmochemické leptání křemíku v zařízení Diener nano. *Chemické listy*. Roč. 108, č. 6, 2014, s. 592-595. ISSN 0009-2770.
- [M46] URBÁNEK, M., KOLAŘÍK, V., **MATĚJKA, M.**, MATĚJKA, F., BOK, J., MIKŠÍK, P., VAŠINA, J. Shaped E-beam nanopatterning with proximity effect correction. *NANOCON 2012, 4th International Conference Proceedings*. Ostrava: TANGER, 2012, s. 717-722. ISBN 978-80-87294-32-1.
- [M47] URBÁNEK, M., KOLAŘÍK, V., **MATĚJKA, M.** SPM Nanoscratching in the Sub 100 nm Resolution. *NANOCON 2011. 3rd International Conference*. Ostrava: TANGER, 2011, s. 213-217. ISBN 978-80-87294-27-7.
- [M48] URBÁNEK, M., **MATĚJKA, M.**, KOLAŘÍK, V., HORÁČEK, M., KRÁTKÝ, S., BOK, J., CHLUMSKÁ, J., MIKŠÍK, P., VAŠINA, J. Variable shape E-beam writing: proximity effect simulation and correction of binary and relief structures. *39th International Conference on Micro and Nano Engineering MNE2013. Book of Abstracts*. Cambridge: University of Cambridge, 2013, s. 582.
- [M49] ŘIHÁČEK, T., MIKA, F., **MATĚJKA, M.**, KRÁTKÝ, S., MÜLLEROVÁ, I. Study of the coherence of the primary beam in the low energy scanning electron microscope. *MC 2015. Microscopy Conference Proceedings*. Göttingen: DGE, 2015, s. 611-612.
- [M50] KOLAŘÍK, V., HORÁČEK, M., **MATĚJKA, M.**, KRÁTKÝ, S., BOK, J. Large-Area Gray-Scale Structures in E-Beam Writer versus Area Current Homogeneity and Deflection Uniformity. *Proceedings of the 15th International Seminar on Recent Trends in Charged Particle Optics and Surface Physics Instrumentation*. Brno: Institute of Scientific Instruments CAS, v.v.i., 2016, s. 26-27. ISBN 978-80-87441-17-6.
- [M51] ŘIHÁČEK, T., MIKA, F., **MATĚJKA, M.**, KRÁTKÝ, S., MÜLLEROVÁ, I. Diffraction in a Scanning Electron Microscope. *Proceedings of the 15th International Seminar on Recent Trends in Charged Particle Optics and Surface Physics Instrumentation*. Brno: Institute of Scientific Instruments CAS, v.v.i., 2016, s. 56-57. ISBN 978-80-87441-17-6.
- [M52] **MATĚJKA, M.**, Deep relief optical structure preparation using Cf4/O2 based reactive ion etching of silicon. *International doctoral seminar, Smolenice castle (2011)*.
- [M53] HORÁČEK, M., KOLAŘÍK, V., **MATĚJKA, M.**, URBÁNEK, M., KRÁTKÝ, S., CHLUMSKÁ, J., KRÁL, S. SMV-2012-05: Reliéfní struktury na principu diftraktivní optiky. Brno: IQ Structures, 2012, s. 2.
- [M54] **MATĚJKA, M.**, URBÁNEK, M., KOLAŘÍK, V., HORÁČEK, M., MATĚJKA, F., KRÁTKÝ, S., MIKŠÍK, P., VAŠINA, J. Variable Shape E-Beam Lithography: Proximity Effect Simulation of 3D Micro and Nano Structures. *NANOCON 2012, 4th International Conference Proceedings*. Ostrava: TANGER, 2012, s. 729-732. ISBN 978-80-87294-32-1.

Seznam použitých zkratek

Ac/Etha	aceton - ethanol
Ag	stříbro
Ar	argon
BK-7	borosilikátové sklo s označením BK-7
BSE	zpětně odražené elektrony
BSS	vzdálenost roztečí svazků
CF ₄	tetrafluormethan
CO	kysličník uhelnatý
CO ₂	kysličník uhličitý
COF ₂	karbonyl fluorid
DCS	dichlorsilan
DOVID	difrakční optický proměnné obrazové zařízení
DRIE	hluboké reaktivní iontové leptání
DUVL	litografie v hluboké ultrafialové oblasti
e	elektron
EBL	elektronová litografie
EBPE	jev blízkosti - proximity efekt
ELG	elektronový litograf
EUVL	litografie v extrémní ultrafialové oblasti
F	fluor
FIBL	iontová litografie
FSE	rychlé sekundární elektrony
h	Planckova konstanta
H ₂ O	voda
H ₃ PO ₄	kyselina fosforečná
HNO ₃	kyselina dusičná
CHF ₃	fluoroform
ICP	indukčně buzená plasma
IO	integrovaný obvod
IPA	isopropylalkohol
KOH	hydroxid draselný
LED	světlo emitující dioda
LPCVD	depozice z chemických par za nízkého tlaku
LRC	chrom s nízkou odrazivostí
MBIK	methylišobutylketon
MEMS	mikro-elektro-mechanické systémy
MFS	minimální velikost prvku

MMS	multifunkční mikro systém
Mo	molybden
MW	molekulární hmotnost
NH ₃	amoniak
NIL	nanoimprint litografie
O ₂	kyslík
PE	primární elektrony
PECVD	plasmaticky posílená depozice z chemických
PGMEA	propylen glycol monomethyl ether acetát
PMMA	polymethylmethakrylát
RF	radiofrekvenční
RIE	reaktivní iontové leptání
RTG	rentgenové záření
SE	sekundární elektrony
SEM	rastrovací elektronový mikroskop
SF ₆	fluorid sírový
SH	silan
Si	křemík
Si ₃ N ₄	nitrid křemičitý
SIN	nitrid křemíku
SiO ₂	oxid křemičitý
SS	velikost svazku
STEM	rastrovací transmisní elektronový mikroskop
TEM	transmisní elektronový mikroskop
TFE	teplená autoemise
TMAH	tetramethylamonium hydroxid
UHV	ultra vysoké vakuum
ULSI	ultra vysoký stupeň integrace
UV	ultrafialové světlo
UVL	litografie v ultrafialové oblasti
V11	vývojka aceton : etylalkohol
VaV	výzkum a vývoj
VF	vysokofrekvenční
VLSI	velmi vysoký stupeň integrace
VSB	tvarovaný svazek
X-RAYL	rentgenová litografie
μSL	mikro-stereolitografie

Seznam použitých symbolů

a_n	šířka exponované plochy n-tého stupně	[μm]
c	hmotnostní koncentrace pevné látky rezistu v rozpouštědle	[%]
d	tloušťka křemíkové desky, nebo hloubka leptu	[μm]
D	dávka ozáření	[$\mu\text{C.cm}^{-2}$]
$D_{100\%}$	programová dávka v procentech expoziční dávky	[%]
D_{max}	maximální expoziční dávka v gradientu	[$\mu\text{C.cm}^{-2}$]
D_n	expoziční dávka pro n-tý stupeň víceúrovňové struktury	[$\mu\text{C.cm}^{-2}$]
D_N^0	dávka ozáření pro bod gelace	[$\mu\text{C.cm}^{-2}$]
$D_N^{0,5}$	citlivost negativního rezistu	[$\mu\text{C.cm}^{-2}$]
D_P^1	extrapolovaná dávka	[$\mu\text{C.cm}^{-2}$]
D_S	čisticí dávka pozitivního rezistu	[$\mu\text{C.cm}^{-2}$]
dx_n	velikost posunu (offsetu) pro n-tou plochu	[μm]
E	Počet expozice	[-]
E_0	kinetická energie primárních elektronů	[eV]
E_a	hustota absorbované energie	[eV.cm ⁻³]
h_{max}	maximální hloubka víceúrovňové struktury	[nm]
I_{SV}	proudová hustota ve svazku	[A.cm ⁻²]
I	počet instrukcí	[-]
k_n	konstanta definující viskózní vlastnosti rezistu	[-]
$\log D$	logaritmus dávky ozáření	[$\mu\text{C.cm}^{-2}$]
$\log(D)$	logaritmus dávky ozáření	
MW	molekulární váha	[-]
N	celkový počet stupňů víceúrovňové struktury	[-]
n	pořadové číslo stupně víceúrovňové struktury	[-]
N_E	počet jednotkových expozic	[-]
p_{prac}	pracovní tlak v plasmatické komoře	[Pa]
PSF	rozptylová funkce	[nm]
P_{VF}	vysokofrekvenční příkon	[W]
Q	expoziční dávka	[C.cm ⁻²]
Q_p	průtok	[sccm]
r	vzdálenost od bodu působení elektronového svazku	[μm]
R_a	průměrná drsnost povrchu	[nm]
r_E	rychlost zápisu (expozice)	[cm ² .h ⁻¹]
$relw$	relativní tloušťka vrstvy rezistu	[-]
R_g	Grünův dolet	[cm]
R_t	tloušťka rezistu	[nm]

S	citlivost pozitivního rezistu	$[\mu\text{C}.\text{cm}^{-2}]$
S_E	plocha zápisu	$[\text{cm}^2]$
T_c	teplota degradace	$[^\circ\text{C}]$
t_E	celková doba zápisu (expozice)	[hod]
T_g	teplota skelného přechodu	$[^\circ\text{C}]$
w	tloušťka vrstvy rezistu po odstředivém lití	[nm].
W_0	šířka membrány, nebo šířka dna anizotropního leptu	$[\mu\text{m}]$
W_m	šířka otvorů v masce	$[\mu\text{m}]$
z	penetrační hloubka	$[\mu\text{m}]$
α	konstanta dopředného rozptylu	$[\mu\text{m}]$
β	konstanta zpětného rozptylu	$[\mu\text{m}]$
γ	kontrast rezistu	[-]
η	poměr energie absorbované z BSE a PE	[-]
θ	úhel mezi rovinou (100) a rovinami {111}	$[^\circ]$
A	perioda mřížky	$[\mu\text{m}]$
λ	vlnová délka světla	[nm]
ν	vlnová délka světla	[nm]
σ	efektivní průměr svazku	[nm]
τ_{BL}	zatemňovací čas (<i>blanking time</i>)	$[\mu\text{s}]$
ω	kruhová rychlost aplikovaná při odstředování	[rpm]

Seznam obrázků

Obr. 2.1.1 Příklad definice reliéfní mikrostruktury a) binárního prvku; b) víceúrovňového prvku.....	2
Obr. 2.1.2 Snímek binárních a víceúrovňových mikrostruktur: výstup binární litografie meandrového motivu bio mikrosenzoru – Au na SiO ₂ (vlevo), šedá litografie on-axis mikro Fresnelovy čočky, detail části víceúrovňové mikrostruktury čočky (vpravo).	2
Obr. 2.2.1 Princip optické litografie: kontaktní (vlevo), blízka resp. proximity (uprostřed) a projekční (vpravo) [7].....	3
Obr. 2.3.1 Blokové schéma elektronového litografu [2].....	5
Obr. 2.3.2 Snímek elektronového litografu Tesla BS600.	7
Obr. 2.3.3 Schéma optické soustavy litografu TESLA BS 600 (vlevo) a detail tvarovacího systému (vpravo), převzato z [17], dle původního[15].	8
Obr. 2.3.4 Snímek elektronového litografu VISTEC EBPG5000plusES.	8
Obr. 2.3.5 Blokové schéma systému VISTEC EBPG5000plusES (vlevo), blokové schéma optického systému (vpravo).	9
Obr. 2.3.6 Schematické znázornění rozptylových jevů při průchodu PE pevnou látkou.....	10
Obr. 2.3.7 Příklady energetických profilů absorbované energie složené ze dvou Gaussových funkcí pro dopředný rozptyl a rozptyl BSE pro dvě různé energie PE.	10
Obr. 2.3.8 Závislost absorbované energie v rezistu (PMMA) na penetrační hloubce elektronů při expoziční dávce 10 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ pro kinetické energie elektronů 15; 30; 50 a 100 keV.....	11
Obr. 2.3.9 Simulace Monte Carlo rozptylových jevů v rezistu PMMA ($w = 1000 \text{ nm}$) na křemíkové desce při energii PE a) 15 keV; b) 50 keV. [CASINO - Monte Carlo Simulation of electron trajectories in solids].....	12
Obr. 2.3.10 Závislost efektivního průřezu svazku elektronů na tloušťce rezistu pro elektrony s kinetickou energií 5; 15; 30; 50 a 100 keV.....	13
Obr. 2.3.11 Princip strategie zápisu obrazového prvku v ELG (vlevo): a) zápis bodovým svazkem kruhového tvaru; b) zápis proměnným tvarovaným svazkem obdélníkového tvaru. Distribuce absorbované energie (dávky) pro oba typy zařízení (vpravo).....	14
Obr. 2.3.12 Příklad přímé konverze B/W datové bitmapy na binární expoziční data, při použití: a) jedné bitmapy; b) tří bitmap.	16
Obr. 2.3.13 Příklad konverze šedé datové bitmapy na expoziční data pro 3D litografii: a) převod gradientu šedi na gradient dávky; b) převod obrazu šedé datové bitmapy	

s motivem LRI (Laser Readable image) na expoziční data s dávkovým gradientem.	17
Obr. 2.3.14 Příklad definice některých typů obrazu pomocí textových objektových instrukcí jazyka ASBEST pro vektorový zápis.	18
Obr. 2.3.15 Pozitivní a negativní rezist z pohledu litografie.	19
Obr. 2.3.16 Křivka citlivosti pro pozitivní rezist (vlevo) a negativní rezist (vpravo).	20
Obr. 2.3.17 Příklad experimentálně změřených křivek citlivosti systému rezistu PMMA a vývojky MBIK:IPA (1:3) pro různé teploty vyvolávání zaznamenaných na ELG Raith-150SEBL @ 30 keV, převzato z [21].	21
Obr. 2.3.18 Princip depozice rezistu metodou odstředivého lití.	22
Obr. 2.3.19 Závislost tloušťky rezistu na rychlosti odstředování pro PMMA 950k rozpuštěný v Anisolu pro 9 % _{hm} a 11 % _{hm} koncentraci [53].	23
Obr. 2.4.1 Princip isotropního leptání.	25
Obr. 2.4.2 Schematický princip anizotropního leptání při Bosch procesu: a) křemíková podložka s litograficky vytvořenou maskou; b) leptací krok; c) polymerizační krok; d) další leptací krok [25].	26
Obr. 2.4.3 Schéma znázorňující reaktor s induktivně buzenou RF plasmou pro plasmatické leptání.	27
Obr. 2.4.4 Popis dvou principů plasmatického leptání: a) chemické leptání - neutrální reaktant chemicky reaguje se substrátem a formuje těkavý produkt; b) iontově asistované leptání - neutrální reaktant sám o sobě nemůže vytvořit těkavý produkt, energetické ionty mění podmínky reakce tak, aby vznikl v místě působení těkavý produkt [32].	27
Obr. 2.4.5 Schematické znázornění některých reakcí probíhajících během leptání v kyslíkové plasmě.	29
Obr. 2.4.6 Princip plasmatického leptání křemíku v CF ₄ přes masku z organického polymeru: a) generace F radikálů v plasmatu; b) difuze F radikálů k povrchu; c) adsorpce F radikálů k povrchu křemíku; d) chemická reakce mezi atomy F a atomy Si; e) desorpce těkavého produktu z povrchu křemíku; f) difuze těkavého produktu reakce do plasmy.	30
Obr. 2.4.7 Schéma reaktoru pro LPCVD depozici Si ₃ N ₄ [18]	32
Obr. 2.4.8 Schéma reaktoru pro PECVD depozici Si ₃ N ₄ [18]	32
Obr. 2.4.9 Schéma membrány tvořené vrstvou, vzniklou mokrým anizotropním leptáním křemíku (100).	33
Obr. 2.4.10 Prolily otvorů vzniklých mokrým anizotropním leptáním křemíku <100>. Pomalé leptání na šikmých spádových hranách tvořené rovinami (111), rychlé leptání	

na horizontálních rovinách (100); V případě protnutí rovin (111) dochází k terminaci leptání [1].	33
Obr. 4.1.1 křivky citlivosti	39
Obr. 4.1.2 Příklad tvorby datového vstupu pro litograf EBL BS600 pro mřížky s pilovým profilem. Nahoře: ideální tvar z parametrického zadání mřížky; dole: aproximace na 8 úrovněový schodkovitý profil reprezentovaný stupni L0-L7 o šířce $a = \Lambda / 8$	40
Obr. 4.1.3 Příklad mřížky s pilovým profilem a její převod na 8 úrovněový schodkovitý profil	41
Obr. 4.1.4 Způsob zápisu algoritmem s vyhlazováním v jednom směru pro 8úrovněovou mřížku s pilovým profilem	42
Obr. 4.1.5 Způsob zápisu algoritmem s vyhlazováním ve dvou směrech pro 8úrovněovou mřížku s pilovým profilem a)část motivu mřížky b)opakující se expoziční motiv.	43
Obr. 4.1.6 Snímek AFM 16 úrovněové mřížky s periodou $\Lambda=10\mu\text{m}$	44
Obr. 4.1.7 Jemný způsob zápisu mřížky s pilovým profilem.....	44
Obr. 4.1.8 Náskres testu s mřížkami pilovitých průběhů (detaily v textu).	45
Obr. 4.1.9 Srovnání změřených profilů 8úrovněových (nahore) a 16úrovněových (dole) mřížek s pilovým profilem.	47
Obr. 4.1.10 Srovnání vyhlazení pro směr kolmý na profil mřížky pro všechny tři typy strategie zápisu.	47
Obr. 4.1.11 Vyhodnocení průměrné drsnosti povrchu (R_a) měřeno na ploše opticky aktivní hrany mřížky.....	48
Obr. 4.1.12 Měření optické účinnosti mřížek pro difrakční řady $m = \langle -4, 4 \rangle$, měřeno laserem $\lambda = 650 \text{ nm}$	48
Obr. 4.1.13 Hodnocení expoziční náročnosti pro jednotlivé mřížky v testu vztažené na plochu 1 mm^2	49
Obr. 4.1.14 Hodnocení výpočtové náročnosti pro jednotlivé mřížky v testu vztažené na plochu 1 mm^2	49
Obr. 4.1.15 Srovnání průběhu lineárního dávkového gradientu a průběhů s modifikací expozičních dávek dle křivky citlivosti pro tři typy víceúrovněových struktur o n stupních.	52
Obr. 4.1.16 Měření víceúrovněového prvku na AFM pro iterativní postup ladění hloubky. ...	54
Obr. 4.1.17 Grafická interpretace reliéfu víceúrovněového prvku požadovaného (čárkovaná čára) a změřeného.....	54

Obr. 4.2.1 Dopředný a boční rozptyl elektronu v rezistu na podložce působící rozšiřování exponované oblasti v rezistu. Expozice v obrazovém bodě A ovlivňuje obrazový bod B.	55
Obr. 4.2.2 Příklad distribuce energie v ploše pro různě velké samostatně stojící objekty exponované stejnou základní expoziční dávkou; profil distribuce absorbované energie.	56
Obr. 4.2.3 Projev EBPE při zápisu objektů těsně sousedících: vlevo dvě sousední plochy; vpravo objekt typu mřížka; zeleně jsou znázorněna obrazová data (exponovaná oblast); šedě je znázorněno rozložení reálné absorbované energie v ploše.....	56
Obr. 4.2.4 Koncepce algoritmu pro simulaci absorbované energie a simulace obrazu po vyvolání.	57
Obr. 4.2.5 Nastavba programového prostředí Expo.NET s nástrojem PES.	58
Obr. 4.2.6 Motiv testu EBPE pro ověření funkce PES: rozložení absorbované energie v ploše (nahore) pro různé základní expoziční dávky; dávkový profil z řezu A–A' a z řezu B–B' (dole). Simulováno pro parametry: $\alpha = 0,09 \mu\text{m}$; $\beta = 1,2 \mu\text{m}$ a $\eta = 0,74$	59
Obr. 4.2.7 Závislost programových hodnot expozičních dávek a skutečných absorbovaných dávek vypočtených v PES v řezu A–A', B–B'.....	60
Obr. 4.2.8 Zobrazení kritických oblastí v obrazci PE testu při jeho vyvolávání.....	60
Obr. 4.2.9 Motiv testu citlivosti rezistu PMMA MW=950k se základní expoziční dávkou $30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ (vlevo) a odpovídající profilometrické měření ze zařízení Alpha–Step 120 KLA–Tencor (vpravo).....	61
Obr. 4.2.10 Průběh křivky citlivosti rezistu PMMA MW = 950k ($w \approx 300 \text{ nm}$) pro vývojku nAAc s dobou vyvolávání 170 s. Odečteno měření z křivky citlivosti exponované základní dávkou $30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ (15 keV); kontrast rezistu $\gamma \approx 2,2$	61
Obr. 4.2.11 Simulace vyvolání motivu v nástroji PES pro různé dávky při aplikaci prahové funkce exponenciálního tvaru s hodnotou kontrastu $\gamma = 2,2$ ($\alpha = 0,1 \mu\text{m}$; $\beta = 1,2 \mu\text{m}$; $\eta = 0,74$).	62
Obr. 4.2.12 Obrazové podklady testu EBPE pro ověření funkce algoritmu PES.	63
Obr. 4.2.13 Srovnání motivu testu EBPE, pro programové dávky $D_0 = 100 \%$, 120% , 140% a 160% ($D_{100\%} = 30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$).	64
Obr. 4.2.14 Koncepce algoritmu PEC pro korekce dávek binárních struktur.	65
Obr. 4.2.15 Obrazové podklady "Fi testu" pro experimentální ověření funkčnosti PEC.....	65
Obr. 4.2.16 Struktura typu binární mřížka pro testování funkce PEC: perioda čar $1,2 \mu\text{m}$, střída $5 : 7$; zápis svazkem obdélníkového tvaru se stranou $a = 0,5 \mu\text{m}$ $b = 1,5 \mu\text{m}$	66

Obr. 4.2.17 Simulace rozložení abs. energie v PES pro motiv binární mřížky bez korekce EBPE. A) motiv mřížky s programovou dávkou $D_{100\%} = 30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, B) Simulace skutečné absorbované energie z PES, C) Simulace vyvolávání pro křivku citlivosti s $D_s = 30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, $\gamma = 2,2$	66
Obr. 4.2.18 Simulace struktury s motivem mřížky modifikované PEC. A) motiv mřížky po aplikaci PEC, B) Simulace dávky ozáření PEC modifikované mřížky v PES, C) Simulace vyvolávání PEC modifikované mřížky pro křivku citlivosti s $D_s = 30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, $\gamma = 2,2$	67
Obr. 4.2.19 Princip konverze tří datových bitmapy na expoziční data s PEC dávkovou optimalizací. A) Vstupní B/W datová bitmapa s motivem Fi testu, B) Resamplovaná bitmapa pro tři zvolená submikronová rozlišení zápisu, C) Konverze bitmapy, D) Dávkově optimalizovaný obraz.	68
Obr. 4.2.20 Simulace obrazového motivu se submikronovými rozlišením bez aplikace PEC procedury, $\text{res} = 0,5 \mu\text{m}$. A) Motiv struktury po konverzi z bitmapy s programovou dávkou $D_{100\%} = 30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$; B) simulace skutečné dávky ozáření se zahrnutím EBPE, dávkové profily ve dvou řezech A–A' a B–B'; C) simulace motivu po vyvolávání ($D_s = 30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, $\gamma = 2,2$).	69
Obr. 4.2.21 Simulace obrazového motivu s PEC modulací dávky. A) Motiv struktury po aplikaci PEC; B) simulace skutečné dávky ozáření se zahrnutím EBPE; C) Simulace vyvolávání ($D_s = 30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, $\gamma = 2,2$).	70
Obr. 4.2.22 Srovnání snímků zaznamenaných mřížkových struktur exponované s různou expoziční dávkou na EBG BS600. Měřeno na CLSM.	72
Obr. 4.2.23 Srovnání záznamu PEC optimalizovaných struktur definovaných datovou bitmapou pro tři rozlišení zápisu (snímky z CLSM).	72
Obr. 4.2.24 Srovnání záznamu struktur zaznamenané se submikronovým rozlišením zápisu s a bez PEC optimalizace (snímky z CLSM).	73
Obr. 4.2.25 Simulace vyvolání motivu v nástroji PES pro různé dávky při aplikaci prahové funkce exponenciálního tvaru s hodnotou kontrastu.	74
Obr. 4.2.26 Simulace distribuce absorbované energie 11úrovňové struktury pro dvě hodnoty koeficientu dopředného rozptylu: $\alpha = 0,1 \mu\text{m}$ (vlevo), $\alpha = 0,49 \mu\text{m}$ (vpravo). ...	75
Obr. 4.2.27 Křivka citlivosti rezistu PMMA MW=350k pro vývojku V11 a dobu vyvolávání 30 s odečtená z křivky citlivosti exponované základní dávku $14 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ (15 keV); kontrast rezistu $\gamma \approx 1$	75
Obr. 4.2.28 Simulace profilu z PES pro 11úrovňovou strukturu pro dvě hodnoty koeficientu dopředného rozptylu: $\alpha = 0,1 \mu\text{m}$ (vlevo), $\alpha = 0,49 \mu\text{m}$ (uprostřed) pro křivku $\gamma \approx 1$; referenční simulace pro $\alpha = 0,1 \mu\text{m}$ a $\gamma = 3$ (vpravo).	76

Obr. 4.2.29 Porovnání profilu 1 úrovně struktury simulovaného v nástroji PES (nahore vlevo) a na AFM měřeného profilu struktury zapsané na ELG BS600 (nahore vpravo). Snímek profilu struktury z AFM (dole) [M46].	77
Obr. 4.3.1 Princip plasmatického ladění hloubky reliéfu mikrostruktur: a) reliéf zaznamenaný s hloubkou h_1 , b) reliéf požadovaný s hloubkou h_2 , c) plasmatické leptání vzorku, d) vzorek po opracování v plasmě s požadovanou výškou reliéfu h_2 .	78
Obr. 4.3.2 Schematické uspořádání plasmatické aparatury TESLA 214VT	79
Obr. 4.3.3 Graf závislosti úbytku rezistu při plasmatickém leptání v kyslíku, VF výkon $P_{VF} = 100W$, pracovní tlak $P_{prac} = 10^3 Pa$: a) rezist SU-8 2000.5; b) rezist PMMA 450k A 11 (viz text).	81
Obr. 4.3.4 Motiv testu pro charakterizaci procesu plasmochemického leptání křemíku zapsaný na litografu BS600 do rezistu PMMA. Snímek motivu testu z optické lupy (vlevo). Snímek jednoho kvadrantu křemíkové desky s litograficky zaznamenaným motivem(vpravo)	82
Obr. 4.3.5 Charakterizace plasmatického leptání křemíku přes rezistovou masku tvořenou A) SU-8 ; B) PMMA.	83
Obr. 4.3.6 Srovnání selektivity leptání při plasmatickém leptání křemíku v CF_4/O_2 v aparatuře TESLA 214VT, při použití leptací masky z materiálu PMMA resp. SU-8	83
Obr. 4.3.7 Srovnání mřížky s periodou $\Lambda = 10 \mu m$ z hlediska laterálního rozšiřování otvorů po jednotlivých krocích leptání. Srovnání hodnot celkové hloubky a šířky leptaných otvorů přes PMMA před a po leptání (vlevo)	84
Obr. 4.3.8 Graf závislosti hloubky leptů v křemíku pro jednotlivé kroky leptání v plasmatické aparatuře Diener Nano; pro konstantní VF výkon 500 W a tři různé pracovní tlaky.	85
Obr. 4.3.9 Graf závislosti hloubky leptů v křemíku pro jednotlivé kroky leptání v plasmatické aparatuře Diener Nano; pro konstantní tlak $p = 30 Pa$ a průtok plynu $Q = 20 sccm$ a tři různé VF výkony.	85
Obr. 4.3.10 Křivky citlivosti PMMA MW 950k pro tři vývojky: IPA : H_2O (95 : 5), nAAc a Ethylalkohol : Aceton (1 : 1).	87
Obr. 4.3.11 Schematické znázornění technologického postupu při tvorbě postupně leptané 4úrovňové struktury v křemíku přes postupně vyvolávanou PMMA masku.	88
Obr. 4.3.12 AFM snímek 4úrovňové mřížkové mikrostruktury s periodou čar $8 \mu m$ leptané v Si(100) přes postupně vyvolávanou leptací masku.	90
Obr. 4.3.13 Schematické znázornění technologického postupu při tvorbě víceúrovňové struktury metodou leptání přes mizící masku.	91

Obr. 4.3.14 Motiv leptací masky v PMMA exponovaný algoritmem s vyhlazováním v jednom směru, 16 úrovní, snímek z AFM.	92
Obr. 4.3.15 Motiv přenesený plasmatickým leptáním do křemíku při výkonu $P_{VF} = 200$ W, době leptání 5 + 10 minut, $Q_p = 20$ sccm CF_4/O_2 (obráčeno zleva doprava).	93
Obr. 4.4.1 Čtveřice motivů difrakčních mřížek pro strukturování nitridové membrány.	94
Obr. 4.4.2 Hlavní procesní kroky při výrobě čipu s nano strukturovanou nitridovou membránou.	95
Obr. 4.4.3 Snímek leptaného motivu v SIN vrstvě z AFM; šířka čáry 200 nm a mezera 200 nm (rozsah na ose z je 132 nm).	98
Obr. 4.4.4 Snímek leptaného motivu v SIN vrstvě z AFM; šířka čáry 100 nm a mezera 200 nm (rozsah na ose z je 82 nm).	98
Obr. 4.4.5 Snímek leptaného povrchu nitridu po procesu RIE s mřížkovým motivem z SEM; motiv s šířkou čáry 200 nm a mezerou 200 nm.	98
Obr. 4.4.6 Snímek leptaného povrchu nitridu po procesu RIE s mřížkovým motivem z SEM; motiv s šířkou čáry 100 nm a mezerou 100 nm.	98
Obr. 4.4.7 Grafický design motivu UV masky.	99
Obr. 4.4.8 Snímek zadní strany křemíkové desky z optické lupy po leptání v lázni KOH.	100
Obr. 4.4.9 Snímek přední strany desky z optické lupy po leptání v lázni KOH.	100
Obr. 4.4.10 Detail snímku membrány s mřížkovou strukturou ve vrstvě SIN při pohledu shora z optického mikroskopu.	101
Obr. 4.4.11 SEM snímek povrchu strukturované membrány s průchozími otvory; motiv čára 50 nm a mezera 250 nm.	102
Obr. 4.4.12 SEM snímek detailu povrchu strukturované membrány s průchozími otvory; motiv čára 50 nm a mezera 250 nm; rozšíření čar o ≈ 20 nm.	102
Obr. 4.4.13 SEM snímek povrchu strukturované membrány s průchozími otvory; motiv čára 100 nm a mezera 200 nm	102
Obr. 4.4.14 SEM snímek detailu povrchu strukturované membrány s průchozími otvory; motiv čára 100 nm a mezera 200 nm; rozšíření čar o ≈ 23 nm.	102

Seznam tabulek

Tab. 2.3.1 Tabulka některých komerčně dostupných rezistů používaných v EBL, dle [2], [50], [51], [52], [53].	22
Tab. 2.3.2 Typické procesní podmínky vytvrzování některých rezistů [50], [51], [52], [53].	24
Tab. 2.4.1 Typické vlastnosti nejběžnějších anizotropních leptadel křemíku [1]	34
Tab. 4.1.1 Tabulka hloubek pro jednotlivé stupně víceúrovňových struktur s maximální hloubkou h_{\max} 200 nm resp. 500 nm.	51
Tab. 4.1.2 Tabulka expozičních dávek odečtených z křivky citlivosti pro hloubky definované v Tab. 4.1.1.	51
Tab. 4.1.3 Tabulka vypočtených a naměřených hodnot při vyhodnocování víceúrovňových struktur zapsaných s vyhlazováním v jednom směru.	52
Tab. 4.1.4 Tabulka vypočtených a naměřených hodnot při vyhodnocování víceúrovňových struktur zapsaných bez vyhlazování.	53
Tab. 4.1.5 Tabulka expozičních dávek pro záznam víceúrovňového reliéfu; dávky původní a modifikované (linearizované).	54
Tab. 4.2.1 Rozptylové parametry pro různá urychlovací napětí. Pro tloušťku rezistu 0,5 μm a křemíkovou podložku [6].	58
Tab. 4.2.2 Hodnoty programových expozičních dávek D_0 a dávek skutečně absorbovaných dle výpočtu PES v částech obrazu v řezech A–A' a B–B'. ($D_0 = 100\% \Rightarrow D = 30\ \mu\text{C}/\text{cm}^2$).	60
Tab. 4.2.3 Proud a proudová hustota pro různé rozměry expozičních svazků před expozicí.	63
Tab. 4.2.4 Podmínky vyvolávání vzorku s testem EBPE. Vývojka n–Amylester kyseliny octové (nAAC).	64
Tab. 4.3.1 Tabulka vypočtených hodnot rychlostí a selektivity leptání ve směsi CF_4/O_2 pro různé nastavení pracovního tlaku a pro konstantní VF výkon 500	85
Tab. 4.3.2 Tabulka vypočtených hodnot rychlostí a selektivity leptání ve směsi CF_4/O_2 pro různé pracovní VF výkony a konstantní pracovní tlak v komoře.	85
Tab. 4.4.1 Procesní parametry leptání molybdenové masky	96
Tab. 4.4.2 Procesní parametry leptání nitridu křemíku přes molybdenovou masku.	97
Tab. 4.4.3 Procesní parametry leptání zbytkové vrstvy nitridu křemíku pro vytvoření průchozích štěrbin.	101

Curriculum Vitae

Jméno: Milan MATĚJKA

Narozen: 2.7.1982 v Brně

Kontakt: xmatej28@stud.feec.vutbr.cz
milan.matejka@isibrno.cz



Vzdělání:

2009-dosud Vysoké učení technické v Brně - Ústav mikroelektroniky
Postgraduální doktorské studium, obor Mikroelektronika a technologie.
Téma studia: Technologie přípravy hlubokých struktur v submikronovém rozlišení.
Obor nebo sektor působení: elektronová litografie, fotolitografie, mikro/nano technologie, mikro a nano výroba

2006-2008 Vysoké učení technické v Brně - Ústav elektrotechnologie
Magisterské studium, obor Elektrovýroba a Management.
Diplomová práce: Pozorování izolantů v ESEM

2002-2005 Vysoké učení technické v Brně - Ústav mikroelektroniky
Bakalářské studium, obor Mikroelektronika a technologie.
Bakalářská práce: Testování metricky SPM pomocí EBL struktur

Praxe:

2012- dosud Stereolitografie, mastering a rekombinace difrakčních optických bezpečnostních prvků.
IQ Structures s.r.o., Praha

2009-dosud Operátor, technolog a programátor elektronového litografu. Mikrovýroba a křemíková technologie.
ÚPT AVČR v.v.i., Brno

2008-2009 Operátor elektronového litografu, technolog a programátor.
Optaglio s.r.o. , Brno

2004-2005 Laborant chemické laboratoře a programátor.
ÚPT AVČR v.v.i., Brno

2001-2002 Laborant chemické laboratoře.
Optaglio s.r.o. , Brno

Jazyky:

Angličtina - slovem i písmem pokročilý

Němčina - základní

Další aktivity:

Spolupráce s průmyslem

2012-dosud Spolupráce s firmou *API Holographics, Salford, Manchester,UK*

2012-dosud Spolupráce s firmou *IQ Structures s.r.o., Praha*

2008 - dosud Spolupráce s firmou *Eltek s.r.o., Brno*

2007-dosud Spolupráce s firmou *TESCAN s.r.o, Brno.*

2010-dosud Spolupráce s firmou *FEI a.s., Brno*

2015-2016 Spolupráce s firmou *GeSiM - Gesellschaft für Silizium-Mikrosysteme mbH, Dresden, DE*

2011-2012 Spolupráce s firmou *ActiveOptics s.r.o, Praha*

2001-2009 Spolupráce s firmou *Optaglio s.r.o., Praha*

Spolupráce s jinými institucemi

2005-dosud *ÚPT AVČR v.v.i., Brno* Spolupráce na řešení VaV projektů v rámci instituce.

2015-dosud *Korean Institute of Science and Technology KIST- UPOT (Ultra precision optics team).* Spolupráce na vývoji rentgenové mikrooptiky a superčoček.

Účast na řešení projektů

2009-2012	FR-TI1/576 - Optimalizace výrobních postupů v elektronové litografii https://www.rvvi.cz/cep?s=jednoduche-vyhledavani&ss=detail&n=0&h=FR-TI1%2F576
2009-2012	FR-TI1/574 - Fotovoltaický panel nové generace https://www.rvvi.cz/cep?s=jednoduche-vyhledavani&ss=detail&n=0&h=FR-TI1%2F574
2009-2013	ED0017/01/01 - Aplikační a vývojové laboratoře pokročilých mikrotechnologií a nanotechnologií https://www.rvvi.cz/cep?s=jednoduche-vyhledavani&ss=detail&n=0&h=ED0017%2F01%2F01
2013-2015	VG20132015124 - Nová metoda měření odezvy konstrukce ochranné obálky pro zajištění bezpečnosti JE i v případě těžkých havárií https://www.rvvi.cz/cep?s=jednoduche-vyhledavani&ss=detail&n=1&h=VG20132015124
2012-dosud	TE01020118 - Elektronová mikroskopie https://www.rvvi.cz/cep?s=jednoduche-vyhledavani&ss=detail&n=0&h=TE01020118
2012-dosud	TE01020233 - Platforma pokročilých mikroskopických a spektroskopických technik pro nano a mikrotechnologie https://www.rvvi.cz/cep?s=jednoduche-vyhledavani&ss=detail&n=0&h=TE01020233
2014-dosud	LO1212 - ALISI - Centrum pokročilých diagnostických metod a technolog https://www.rvvi.cz/cep?s=jednoduche-vyhledavani&ss=detail&n=0&h=LO1212